

**Qualifizierung und Automatisierung  
eines thermohydraulischen Teststandes**

**BACHELORARBEIT**

für die Prüfung zum  
Bachelor of Engineering

des Studienganges Maschinenbau  
an der Dualen Hochschule Baden-Württemberg Stuttgart

von  
Jens Rheinländer

Abgabedatum: 10.09.2013

Bearbeitungszeitraum:	10.06.2013 – 10.09.2013 (13 Wochen)
Matrikelnummer, Kurs:	5523346, STG-TMB10KE2
Ausbildungsfirma:	DLR, Stuttgart
Betreuer der Ausbildungsfirma:	Dipl.-Phys. Birgit Gobereit
Zweitgutachter der Dualen Hochschule:	Dipl.-Ing. (BA) Sebastian Hoh

**Erklärung zur Eigenleistung**

## Erklärung

Gemäß § 5 (2) der „Studien- und Prüfungsordnung der DHBW Technik“ vom 18. Mai 2009.

Ich habe die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet.

Stuttgart, den \_\_\_\_\_

Ort

Datum

\_\_\_\_\_  
Unterschrift

## **Kurzfassung**

Mit einem thermohydraulischen Teststand, der am Institut für Solarforschung des DLR entwickelt wurde, können Rohre bezüglich Wärmeübergang und Druckverlust bei verschiedenen Luftmassenströmen charakterisiert werden. Dazu wird das zu testende Rohr in einem isolierten Becken mit Dampf beheizt und mit Luft durchströmt. Hierbei wird die Druck- und Temperaturdifferenz gemessen.

Die vorliegende Bachelorarbeit beschäftigt sich mit der Qualifizierung und Automatisierung des Teststandes. Für die Qualifizierung wurden Messungen an einem Glattrohr (Außendurchmesser: 22.4mm; Wandstärke: 1.4mm; wärmeübertragende Länge: 1,000mm) durchgeführt und mit analytischen Berechnungen und FEM-Simulationen verglichen.

Für die Automatisierung des Teststandes wurde ein Konzept festgelegt und umgesetzt.

Weiterhin wurden Optimierungsmaßnahmen durchgeführt. Im Wesentlichen sind hier Maßnahmen zur Verbesserung der Wasserrückführung in das Becken, eine benutzerfreundliche Bedienoberfläche der Steuerung und bessere Isolierung des Beckens zu nennen. Für den letzten Teil der Arbeit wurden Messungen mit unterschiedlich strukturierten Rohren durchgeführt und mit den Messungen am Glattrohr verglichen.

## **Abstract**

With a thermal-hydraulic test stand, which was developed at the DLR Institute of Solar Research, tubes can be characterized in heat transfer and pressure drop at different air mass flows. The testing tube is heated in an insulated tank with steam and air flows through the tube. Pressure and temperature difference is measured.

This bachelor thesis deals with the qualification and automatization of the test stand. For the qualification measurements were executed on a plain tube (outer diameter: 22.4mm; thickness: 1.4mm; heat transferring length: 1,000mm) and compared with analytical calculations and FEM-simulations.

A concept for the automation of the test stand was defined and implemented.

Further optimization methods were executed. Essentially mentioned are measures to improve water recirculation into the tank, a user-friendly interface of the control and better isolation of the tank. For the last part of this thesis measurements of differently structured tubes are compared with measurements of a plain tube.

## Inhaltsverzeichnis

1.	Formelzeichen .....	5
2.	Einleitung .....	7
3.	Stand der Technik.....	8
4.	Wasserverlust .....	10
4.1	Wasser-Nachfüllvorrichtung .....	10
4.2	Konzept zur Verringerung des Dampfverlustes .....	12
5.	Stoffwerte Luft .....	14
6.	Ermittlung der PID-Reglerkoeffizienten für Massenstromregelung .....	16
7.	Automatisierung des Teststandes .....	17
7.1	Mess- und Steuerhardware .....	17
7.2	Signallaufplan des automatisierten Teststandes .....	19
7.3	Benutzeroberfläche.....	20
7.4	Programmbeschreibung.....	22
7.4.1	Zugriff auf Ein- und Ausgabemodule .....	23
7.4.2	Zwischenspeichern der Messwerte.....	23
7.4.3	Abspeichern der Messwerte .....	24
7.4.4	Visualisierung der Messwerte .....	25
7.4.5	Funktion: Vorheizen auf 95°C .....	25
7.4.6	Massenstromregelung.....	25
7.4.7	Reynoldszahlberechnung .....	26
7.4.8	Flüssigkeitsüberwachung .....	26
7.4.9	Messsteuerung.....	27
7.4.10	Funktion: Messung hin und zurück.....	29
7.4.11	Signalanzeigen .....	30
7.4.12	Statusmeldungen .....	31
7.4.13	Ausschalten des Teststandes .....	31
8.	Bestimmung der Messunsicherheiten.....	32
8.1	Messunsicherheit bei der Reynoldszahlberechnung .....	32
8.2	Messunsicherheit bei der Druckverlustmessung .....	33
8.3	Messunsicherheit bei der Wärmestrombestimmung aus der Messung .....	34
9.	Bestimmung des Druckverlustes im Testrohr .....	35

10. Reduzierung des zusätzlichen Wärmeeintrages .....	37
10.1 FEM-Berechnung .....	37
10.1.1 Berechnungskonfiguration Ausgangszustand des Teststandes .....	38
10.1.2 Berechnungskonfiguration mit Isolierung.....	40
10.1.3 Diskussion der Ergebnisse .....	41
10.2 Einbau einer zusätzlichen Isolierung.....	43
10.3 Messergebnisse.....	46
11. Bestimmung des Wärmeeintrages im Glattrohr .....	48
11.1 Berechnung nach VDI-Wärmeatlas mit Überschlagsformel.....	48
11.2 Berechnung nach VDI-Wärmeatlas in Abhängigkeit vom Strömungszustand.....	49
11.3 Berechnung nach Fundamentals of Heat and Mass Transfer.....	50
11.4 Vergleich Theorie mit Glattrohr.....	51
12. Vergleich verschiedener strukturierter Rohre .....	53
13. Zusammenfassung und Ausblick .....	59
14. Abbildungsverzeichnis .....	60
15. Tabellenverzeichnis.....	62
16. Literatur .....	63
17. Anhang .....	66
17.1 Bedienungsanleitung automatisierter Teststand.....	66
17.2 Fertigungszeichnung Isolierscheiben .....	72

## 1. Formelzeichen

$A$	$[m^2]$	Fläche
$c$	$\left[\frac{m}{s}\right]$	Geschwindigkeit
$c_p$	$\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck
$d$	$[m]$	Durchmesser
$g$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Erdbeschleunigung
$h$	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	spezifische Enthalpie
$\Delta h_v$	$\left[\frac{kJ}{kg}\right]$	spezifische Verdampfungsenthalpie
$K$	$[ ]$	Verstärkungsfaktor
$l$	$[m]$	Länge
$m$	$[kg]$	Masse
$\dot{m}$	$\left[\frac{kg}{h}\right]$	Massenstrom
$Nu$	$[ ]$	Nußelt-Zahl
$p$	$[Pa]$	Druck
$Pr$	$[ ]$	Prandtlzahl
$Q$	$[J]$	Wärme
$\dot{Q}$	$[W]$	Wärmestrom
$Re$	$[ ]$	Reynoldszahl
$t$	$[s]$	Zeit
$T$	$[s]$	Periodendauer
$\dot{V}$	$\left[\frac{m^3}{s}\right]$	Volumenstrom
$Y_V$	$\left[\frac{m^2}{s^2}\right]$	(spezifische) Verlustenergie
$z$	$[m]$	Höhe

$\alpha$   $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$  Wärmeübergangskoeffizient

$\zeta$   $[\ ]$  Rohrreibungszahl

$\vartheta$   $[^{\circ}C]$  Temperatur

$\lambda$   $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$  Wärmeleitfähigkeit

$\nu$   $\left[\frac{m^2}{s}\right]$  kinematische Viskosität

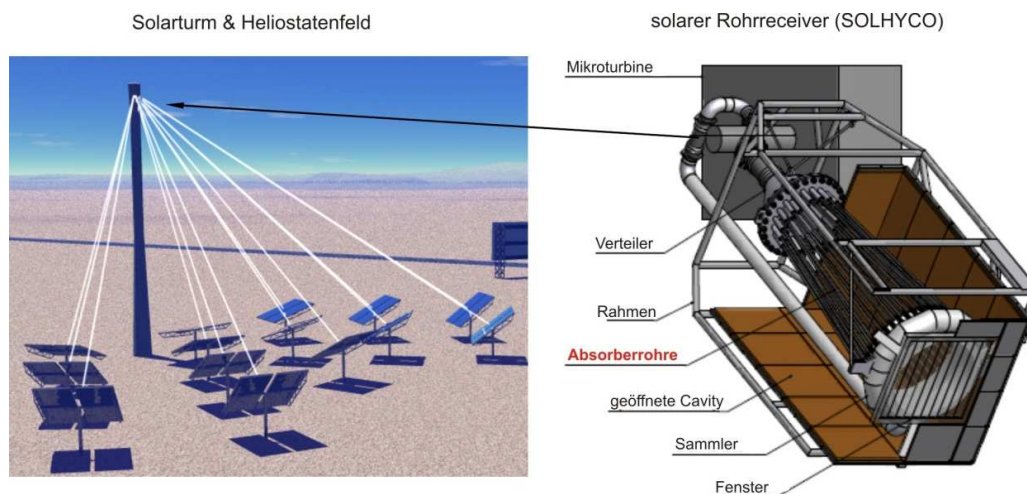
$\rho$   $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$  Dichte

## 2. Einleitung

In der Zukunft sollen zur Senkung der Treibhausgase immer mehr Energie aus CO<sub>2</sub>-neutralen erneuerbaren Energiequellen gewonnen werden. Das DESERTEC-Konzept [DEK13] setzt unter anderem auf die Nutzung von Solarenergie im Sonnengürtel der Erde [DES13a]. In verschiedenen Studien wird das Potenzial von solarthermischen Kraftwerken aufgezeigt [z.B. TFP13, TFA07, TFM05, TFT06]. Ein Quadratkilometer Wüste reicht laut Berechnungen des Deutschen Zentrums für Luft- um Raumfahrt aus, um 100,000<sup>1</sup> Haushalte mit 250 Mio. kWh Strom pro Jahr zu versorgen [DES13b].

Mit Hilfe von solarthermischen Turmkraftwerken kann Solarstrahlung in elektrische Energie umgewandelt werden. Durch Spiegel (Heliostate), die der Sonne nachgeführt werden, wird das Sonnenlicht auf einen zentralen Strahlungsempfänger (Receiver) fokussiert, der sich auf einem Turm befindet (Abb. 1 [SOL12]). Dort wird die Strahlung in Wärme umgewandelt und anschließend kann diese in elektrische Energie umgesetzt werden.

Eine Ausführung eines solchen Receivers ist der Rohrreceiver [RoR13] (Abb. 1). Dieser besteht aus mehreren Receiverrohren, welche die Solarstrahlung absorbieren und als Wärme auf ein Arbeitsmedium übertragen.



**Abb. 1: Solarthermisches Turmkraftwerk**

Mit Hilfe eines thermohydraulischen Teststandes, des DLR-Instituts für Solarforschung, können verschieden strukturierte Receiverrohre charakterisiert werden. Mittels des Teststandes können der Druckverlust von luftdurchströmten Rohren, sowie die Wärmeübertragung in Abhängigkeit des Durchflusses bestimmt werden.

Ziel dieser Arbeit ist die Qualifizierung und Automatisierung des Teststandes.

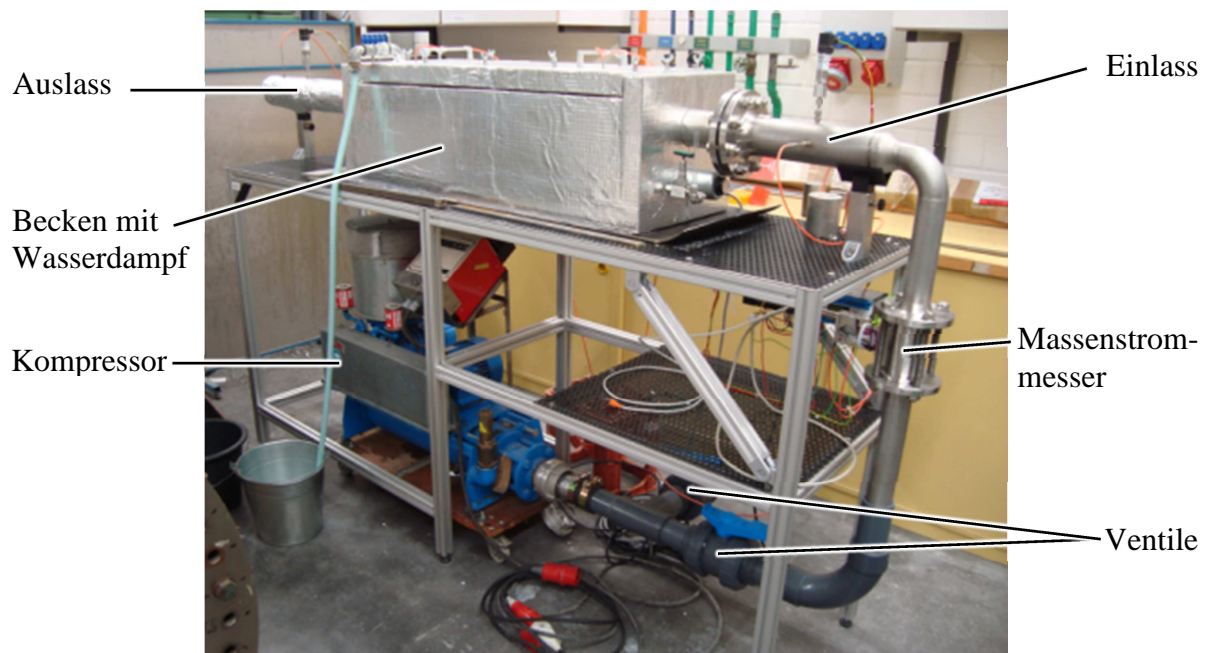
<sup>1</sup> In der gesamten Bachelorarbeit werden Dezimalpunkt und Komma als Tausendertrennzeichen verwendet.



### 3. Stand der Technik

Mit Hilfe eines thermohydraulischen Teststandes können Rohre bezüglich Druckverlust und Wärmeübertragung charakterisiert werden. Das zu vermessende Rohr wird mit Wasserdampf beheizt und mit Luft durchströmt. Die von der Luft aufgenommene Wärme und somit der Wärmestrom durch das Rohr lässt sich über die Temperaturänderung der Luft ermitteln. Der Teststand wurde im Rahmen von Projekt SOLTUBE<sup>1</sup> entwickelt [SOL12]. Im Rahmen einer Praxisarbeit [RhJ13, S. 8] wurden vorbereitende Untersuchungen an dem Teststand durchgeführt.

Der Aufbau des Teststandes ist in Abb. 2 dargestellt.



**Abb. 2: Aufbau des Teststandes**

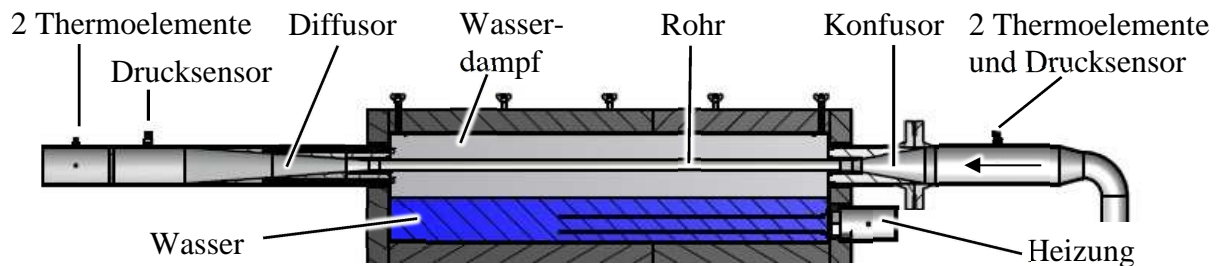
Der Teststand besteht aus einem Luft-Kompressor (HEW, D-4900 Herford, Typ: L100L/2K, Leistung: 8kW) dessen Drehzahl eingestellt werden kann. Nach dem Kompressor befinden sich ein Durchflussventil und ein Bypassventil, über die zusätzlich der Massenstrom manuell variiert werden kann. Der tatsächlich eingestellte Massenstrom wird vor dem Einlass gemessen.

---

<sup>1</sup> Projekt zur Entwicklung und Qualifizierung von Absorberrohren für solare Hochtemperaturanwendung

In Abb. 3 ist ein Querschnitt durch Einlass, Becken mit Testrohr und Auslass, sowie die Position der Sensoren abgebildet.

Nach dem Konfusor im Einlass folgt das zu vermessende Rohr, das sich in einem wärmeisolierten Becken befindet. Über einen Diffusor im Auslassrohr wird die erwärmte Luft an die Umgebung wieder abgegeben.



**Abb. 3: Teststand mit Receiverrohr im eingebautem Zustand**

Um mit geringen Strömungsverlusten von einem großen Rohrdurchmesser auf einen kleineren Durchmesser zu kommen werden Konfusor und Diffusor verwendet. Diese befinden sich im Ein- bzw. Auslassrohr.

Mit Hilfe auswechselbarer Buchsen im Kon- und Diffusor können Rohre mit unterschiedlichen Durchmessern und einer Länge von  $1,050\text{m}$  eingebaut werden.

Die wärmeübertragende Länge des Rohres im Becken beträgt  $1\text{m}$ .

Am Ein- und Auslass befinden sich jeweils zwei Thermoelemente und je ein Drucksensor, damit die Temperatur- und Druckdifferenz der durchströmenden Luft ermittelt werden kann. Im Becken befindet sich Osmosewasser<sup>1</sup>. Dieses wird mithilfe einer Heizung zum Sieden gebracht. Mit dem Wasserdampf wird das zu testende Rohr gleichmäßig auf ca.  $100^\circ\text{C}$  geheizt.

<sup>1</sup> Für die Experimente wird durch Umkehrosmose gefiltertes Wasser verwendet, um Ablagerungen im Teststand zu minimieren.

#### **4. Wasserverlust**

Damit sich kein Überdruck im Becken aufbaut, ist das Becken nicht vollständig geschlossen. Über eine Öffnung im Deckel kann der Wasserdampf entweichen. Dadurch sinkt mit der Zeit der Wasserpegel im Becken. Folglich ist die Zeit begrenzt, in der Messungen ohne Unterbrechung durchgeführt werden können.

Nachfolgend wird beschrieben, wie bei geschlossenem Becken Wasser nachgefüllt werden und wie der Dampfverlust verringert werden kann.

##### **4.1 Wasser-Nachfüllvorrichtung**

Damit bei geschlossenem Behälter Wasser nachgefüllt werden kann, wurden zwei Nachfüllvorrichtungen vorgesehen.

Bei der Erweiterung des Teststandes wurden die vorhandenen Öffnungen des Teststandes (Dampfablass und Flüssigkeitsanzeige) verwendet.

In Abb. 4 ist die Vorrichtung abgebildet, mit der Wasser in großen Mengen nachgefüllt werden kann, wenn das Wasser im Becken nicht siedet. Am Auslass wurde eine Flüssigkeitskühlung ergänzt (Abb. 4, weißer Schlauch), welche allerdings nicht genügend Wärme abführen kann, um den Dampf in ausreichender Menge zu kondensieren.

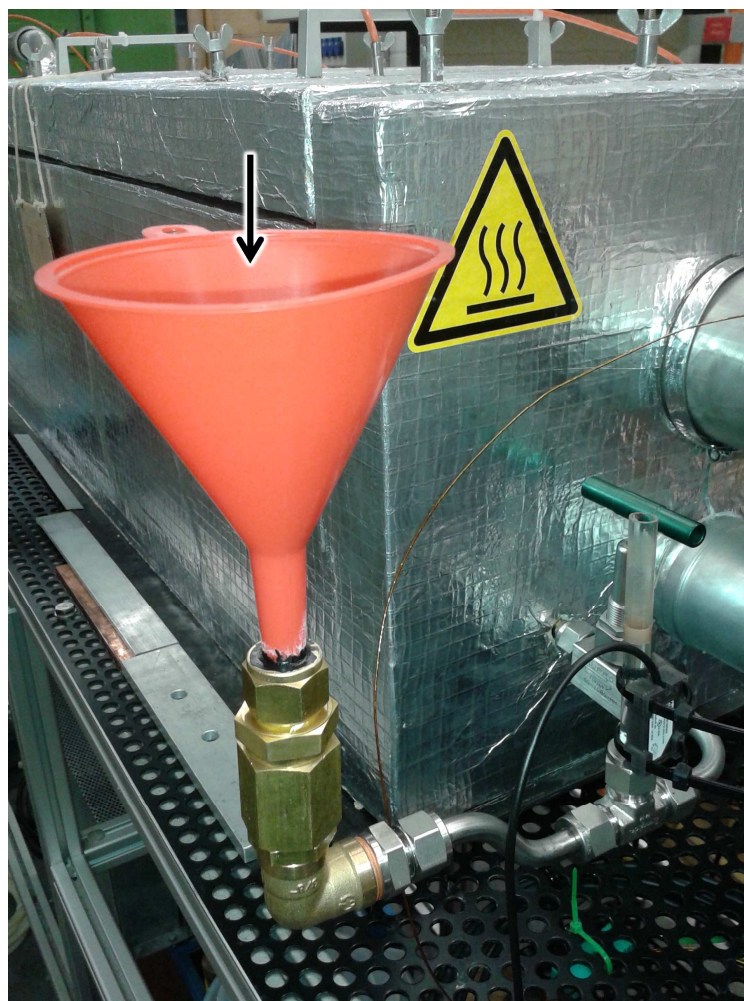


**Abb. 4: Wassernachfüllung in geschlossenes Becken mit größerem Durchfluss**

Im Betrieb wird der 90°-Rohrwinkel durch einen Schlauch ausgetauscht, über den der überschüssige Wasserdampf an die Umgebung abgegeben wird. Kondensierendes Wasser wird in einem Eimer aufgefangen. Hier kann während des Betriebes kein Wasser nachgefüllt werden, da Wasserdampf entweicht und Verbrennungsgefahr an heißen Teilen besteht.

Für diesen Fall wird eine Vorrichtung benötigt, welche unterhalb des Wasserspiegels angebracht ist. Hierfür eignet sich der bereits vorhanden Bypass für die Flüssigkeitsstandmessung.

Eine Erweiterung dieses Bypasses mit einem Einfülltrichter (siehe Abb. 5) ermöglicht das Nachfüllen.



**Abb. 5: Nachfüllvorrichtung unterhalb des Wasserspiegels**

Dieser Einlass ist unterhalb des Wasserspiegels. Somit ist es möglich während des Betriebes Wasser nachzufüllen, da hier kein heißer Wasserdampf entweicht. So können auch längere Messreihen ohne Unterbrechung durchgeführt werden.

Aufgrund des geringen Rohrquerschnittes ist die Durchflussgeschwindigkeit hier geringer als bei der anderen Vorrichtung.

## 4.2 Konzept zur Verringerung des Dampfverlustes

Mit einem Vorversuch wurde bestimmt, wie viel Wasser mit der Zeit maximal verloren geht. Bei dem Versuch wurde das Wasser erhitzt, ohne dass durch einen Luftstrom im Rohr Wärme abgeführt wurde.

Innerhalb von  $t = 5h$  verdampften  $10.5l \triangleq 10.5kg$  Wasser aus dem Becken in die Umgebung. Dies entspricht ungefähr der Differenz zwischen maximaler und minimaler Füllmenge.

Mit Hilfe dieser Daten lässt sich die Fläche abschätzen, die benötigt wird, um das Wasser wieder zu kondensieren. Das kondensierte Wasser könnte in das Becken zurückgeführt werden, um den Arbeitsablauf zu vereinfachen.

Die spezifische Verdampfungsenthalpie  $\Delta h_v$  von Wasser bei  $\vartheta = 100^\circ C$  und  $p = 1bar$  berechnet sich mit Formel (1) [Her12, S. 114]. Die Stoffdaten ( $h''$ -spezifisch Enthalpie gesättigter Dampf;  $h'$ -spezifische Enthalpie siedende Flüssigkeit) sind dem VDI-Wärmeatlas entnommen. [VDI06, S. Db3]

$$\Delta h_v = h'' - h' = 2,675.6 \frac{kJ}{kg} - 419.1 \frac{kJ}{kg} = 2,256.5 \frac{kJ}{kg} \quad (1)$$

Die Verdampfungswärme für  $5h$  lässt sich mit Gleichung (2) berechnen.

$$Q = \Delta h_v \cdot m_{\text{Verlust}} = 2,256.5 \frac{kJ}{kg} \cdot 10.5kg = 23,693.3kJ \quad (2)$$

Folglich ergibt sich mit Gleichung (3) der durch Konvektion abzuführende Wärmestrom.

$$\dot{Q} = \frac{Q}{t} = \frac{23,693.3kJ}{5h} = \frac{23,693.3 \cdot 10^3 J}{5 \cdot 3,600s} \approx 1.3kW \quad (3)$$

Für die Abschätzung wird eine Kühlung durch freie Konvektion angenommen.

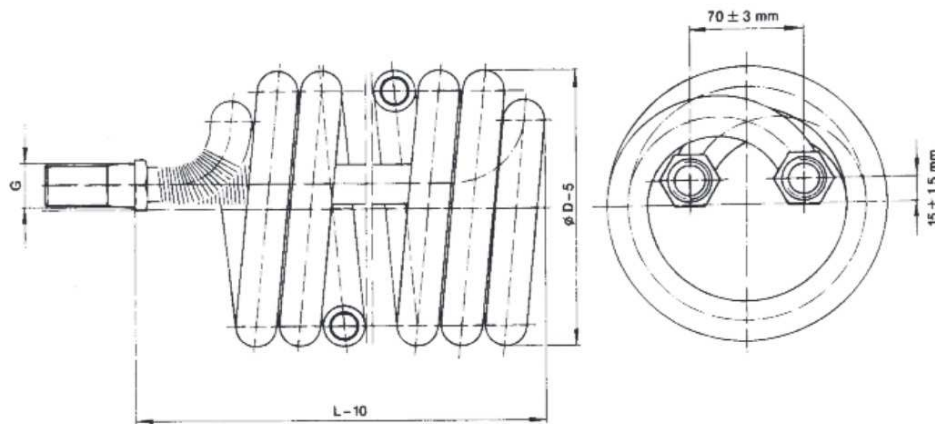
Der Wärmeübergangskoeffizient wird mit  $\alpha = 4.5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  und die Temperaturdifferenz mit  $\Delta T = 70K$  angenommen.

Somit ergibt sich nach Gleichung (4) [Dub07, S. D29] eine benötigte Oberfläche von ca.  $4 m^2$ .

$$A = \frac{\dot{Q}}{\alpha \cdot \Delta T} = \frac{1,300W}{4.5 \frac{W}{m^2 \cdot K} \cdot 70K} \approx 4m^2 \quad (4)$$



Daher würde sich als Kondensationsvorrichtung eine Kondensationswendel (Abb. 6) anbieten. Diese gibt es mit einer gerippten Oberfläche von  $3.2m^2$ . [MPG13, S. 13]



**Abb. 6: Kondensationswendel**

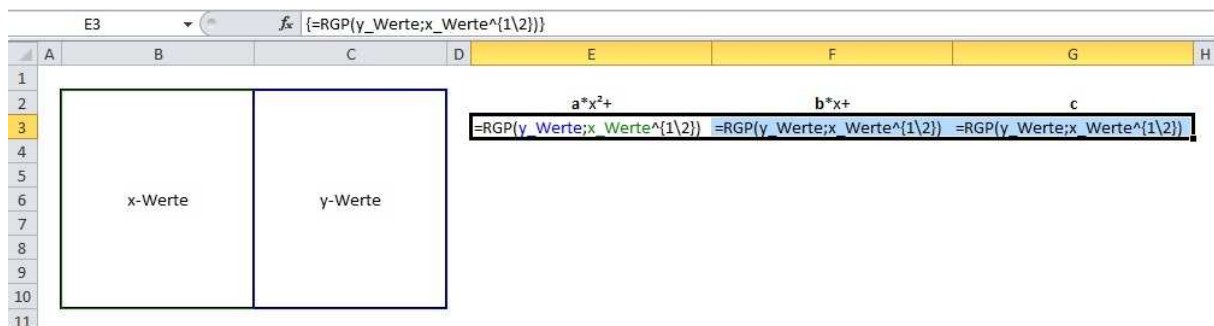
Diese Vorrichtung sollte ausreichen, um einen Großteil des Wassers zu kondensieren und direkt in das Becken zurücklaufen zu lassen.

## 5. Stoffwerte Luft

Für die Berechnungen der Reynoldszahl, des Wärmeübergangs und des Druckverlustes werden verschiedene Stoffwerte von Luft bei unterschiedlichen Temperaturen benötigt. Diese sind z.B. als tabellierte Werte im VDI-Wärmeatlas [VDI06] zu finden. Mittels einer Ausgleichsrechnung kann eine Formel zur Berechnung der Stoffwerte innerhalb eines Temperaturbereiches bestimmt werden. Diese Formel kann z.B. eine Polynomfunktion sein.

In Excel lassen sich die Koeffizienten einer Polynomfunktion n-ten Grades mit Hilfe der RGP-Funktion bestimmen. Die Ermittlung erfolgt über die Methode der kleinsten Quadrate. [ExH10]

In Abb. 7 ist das Schema für die Verwendung der RGP-Funktion für eine quadratische Ausgleichsfunktion dargestellt.



	A	B	C	D	E	F	G	H
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								

**Abb. 7: Schema Anwendung RGP-Funktion in Excel**

Innerhalb der RGP-Funktion werden die x-Werte mit den Potenzen der Polynomfunktion verbunden: „ $\wedge\{1\2\}$ “. Die zu bestimmenden Koeffizienten werden als Array ausgegeben, folglich muss die RGP-Funktion als Array-Funktion über n+1 Zellen definiert werden. [Geo13]

Die x- und y-Werte werden aus dem VDI-Wärmeatlas [VDI06, S.Dbb2] entnommen. Hierbei ist x die Temperatur und y der dazugehörige Stoffwert.

Die Genauigkeit der Ausgleichsfunktion wird über die Anzahl der Nachkommastellen der Koeffizienten gesteuert.

Die Ausgleichsfunktionen (5) bis (7) (Gültigkeitsbereich: 0...200°C) haben eine Abweichung geringer als  $\pm 0.1\%$  von den Tabellenwerten.

- Kinematische Viskosität:

$$\nu = 9.73 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta^2 + 9.02 \cdot 10^{-1} \cdot \vartheta + 1.35 \cdot 10^2 \quad [\nu] = 10^{-7} \frac{m^2}{s} \quad (5)$$

- Wärmeleitfähigkeit:

$$\lambda = -3.07 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta^2 + 7.54 \cdot 10^{-2} \cdot \vartheta + 2.44 \cdot 10^1 \quad [\lambda] = 10^{-3} \frac{W}{m \cdot K} \quad (6)$$

- Spezifische Wärmekapazität:

$$c_p = 4.09 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta^2 + 1.50 \cdot 10^{-5} \cdot \vartheta + 1.01 \quad [c_p] = 10^3 \frac{J}{kg \cdot K} \quad (7)$$

Für die Berechnung der Dichte wird eine bereits vorhandene Ausgleichsfunktion (8) [Fit13] verwendet, da diese genau genug ist.

$$\rho = 348.81 \cdot (\vartheta + 273.15)^{-1.0003} \quad [\rho] = \frac{kg}{m^3} \quad (8)$$



## 6. Ermittlung der PID-Reglerkoeffizienten für Massenstromregelung

Für die Automatisierung werden Koeffizienten für den PID-Regler, welcher den Massenstrom regelt, benötigt. Die Ermittlung der PID-Reglerkoeffizienten  $K_c$ ,  $T_i$  und  $T_d$  erfolgt mittels einer Einstellregel nach Ziegler und Nichols [Dub07, S.X17]. Hierzu wird der PID-Regler als reiner P-Regler ( $T_i = T_d = 0min$ ) betrieben. Die Reglerverstärkung  $K_{PR}$  des P-Reglers wird so lange vergrößert, bis eine ungedämpfte Dauerschwingung des Massenstroms entsteht ( $K_{PR} = K_{PRkrit}$ ). In Abb. 8 ist diese Dauerschwingung bei  $K_{PR} = 20 = K_{PRkrit}$  des Systems dargestellt. Es lässt sich eine kritische Periodendauer  $T_{krit} = 22s$  ablesen.

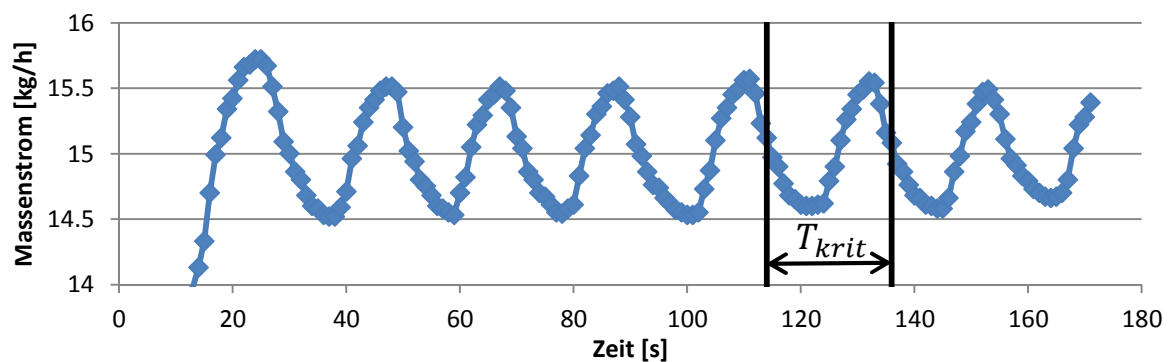


Abb. 8: ungedämpfte Dauerschwingung

Die Reglerkoeffizienten lassen dann mit diesen beiden Parametern berechnen. [Dub07, S.X17-X18]

$$K_c = K_{PR} = 0.6 \cdot K_{PRkrit} = 0.6 \cdot 20 = 12 \quad (9)$$

$$T_i = T_N = 0.5 \cdot T_{krit} = 0.5 \cdot 22s = 0.18333min \quad (10)$$

$$T_d = T_V = 0.12 \cdot T_{krit} = 0.12 \cdot 22s = 0.04583min \quad (11)$$

In Abb. 9 ist beispielhaft der Verlauf des Massenstroms dargestellt, wenn der PID-Regler mit den berechneten Koeffizienten den Massenstrom auf 10kg/h einstellt. Nach einer Einlaufzeit von ca. 1 min erreicht der Massenstrom den gewünschten Wert und wird mit einer Abweichung <5% auf diesem gehalten.

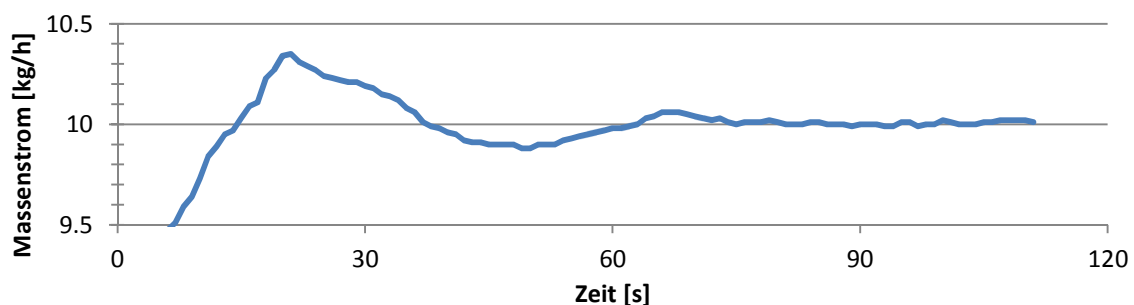


Abb. 9: PID Massenstromeinstellung

## 7. Automatisierung des Teststandes

Um den Bediener zu entlasten und besser reproduzierbare Einstellungen vornehmen zu können, wurde der Teststand automatisiert.

Für die Automatisierung wurde eine Ablaufsteuerung in LabVIEW 10<sup>1</sup> [Lab10] programmiert. Diese Steuerung liest die Messhardware aus und steuert die Steuerhardware an. Eine Bedienungsanleitung für den automatisierten Teststand befindet sich im Anhang 17.1.

### 7.1 Mess- und Steuerhardware

Folgende Messsensoren sind am Teststand verbaut:

- *Thermoelemente Typ K*
- *Pt100-Widerstandsthermometer*  
(Genauigkeitsklasse A)
- *Drucksensoren*  
(Wagner Mess- und Regeltechnik, Typ: P-025, Messbereich: 0 ... 250mbar\_Überdruck, Genauigkeit:  $\pm 0.25\%$  v. Endwert) [Dru13]
- *Drucksensor*  
(Wagner Mess- und Regeltechnik, Typ: P-025, Messbereich: 0 ... 1100mbar\_Absolut, Genauigkeit:  $\pm 0.25\%$  v. Endwert) [Dru13]
- *Massenstrommesser*  
(Bronkhorst, Typ: F-106BZ-AGD-03-V, Messbereich: 3 ... 150 m<sup>3</sup>/h Luft, Genauigkeit:  $\pm 0.8\%$  v. Messwert  $\pm 0.2\%$  v. Endwert)
- *Kapazitiver Flüssigkeitssensor*  
(Balluff, BCS008M) [KaS13]

Als Messwerterfassungssystem wird eine LogMessage 500 [DeH13] von der Firma Delphin [Del13] verwendet.

Genauigkeit der LogMessage 500:

- Volt, mA: 0.01% v. Messbereich
- Pt100: 0.1K
- Pt1000: 0.01K
- Thermoelemente: 0.1% v. Messbereich

---

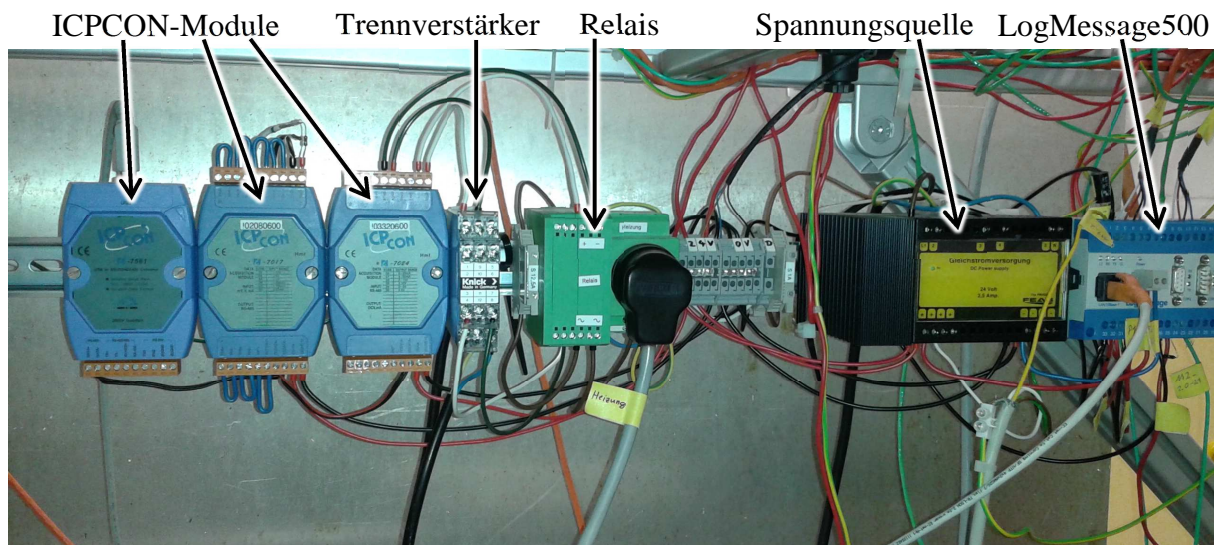
<sup>1</sup> LabVIEW: grafisches Programmiersystem von National Instruments

Zusätzliche werden folgende I/O-Module der ICPCON-Reihe [Spe13] verwendet:

- I7561 (USB nach RS-232/422/485 Wandler)
- I7017 (8 analoge Eingänge, 0...10V)
- I7024 (4 analoge Ausgänge, 0...10V)

Weiterhin werden ein Halbleiterrelais (crydom HD4840) [CHD13] für die Schaltung der Heizung und ein Trennverstärker (Knick, DC Isolation Amplifier, Typ: 4310 A2, Input: 0...10V, Output: 0...10V) für die Drehzahlsteuerung des Kompressors verwendet.

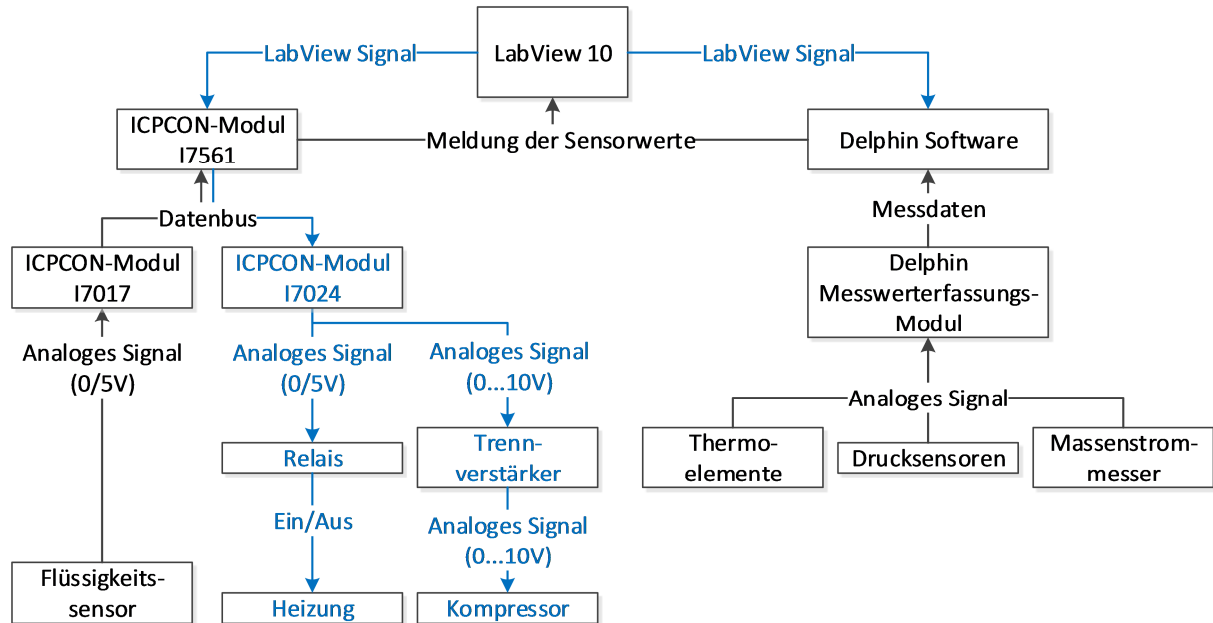
Abb. 10 zeigt die verbaute Steuerhardware und das Messwerterfassungssystem.



**Abb. 10: Automatisierungshardware**

## 7.2 Signallaufplan des automatisierten Teststandes

Abb. 11 zeigt einen Signallaufplan zwischen der Steuerungssoftware LabVIEW und der Mess- und Steuerhardware.



**Abb. 11: Signallaufplan automatisierter Teststand**

Die Temperatur-, Drucksensoren und der Massenstrommesser sind mit einer LogMessage500 verbunden. Diese speichert die Messwerte intern ab und wird von LabVIEW über die Delphin-Software [DeS13] ausgelesen.

Der Flüssigkeitssensor ist über ein ICPCON-Modul (I7017) mit dem Steuerrechner verbunden. Der Sensor ist so verschaltet, dass bei genügend Wasser 5V und bei zu wenig Wasser 0V ausgegeben werden.

Die Heizung wird über ein Relais geschaltet. Bei 5V am Steuereingang des Relais ist die Heizung an und bei 0V die Heizung aus. Das analoge Steuersignal für das Relais wird von einem ICPCON-Modul (I7024) ausgegeben.

Die Kompressordrehzahl wird mit einem weiteren analogen Ausgang des Moduls gesteuert.

Die für die Drehzahlsteuerung des Kompressors benötigte Leistung wird durch einen zwischengeschalteten Trennverstärker bereitgestellt.

Für die Verbindung der Module mit dem Messrechner ist das ICPCON-Modul I7561 eingebaut, welches per USB an den Rechner angeschlossen wird.

### 7.3 Benutzeroberfläche

LabVIEW bietet die Möglichkeit eine Benutzeroberfläche zu gestalten. Das Layout der Bedienoberfläche für den thermohydraulischen Teststand ist in Abb. 12 dargestellt ist. Die Oberfläche gliedert sich in Bereiche für Schaltflächen, manuelle Eingaben und Ausgaben.

Im nachfolgenden Kapitel 7.4 wird auf die Funktionen der eingerahmten und mit Kapitelnummern versehenen Anzeige- und Bedienelemente der Oberfläche noch im Detail eingegangen.

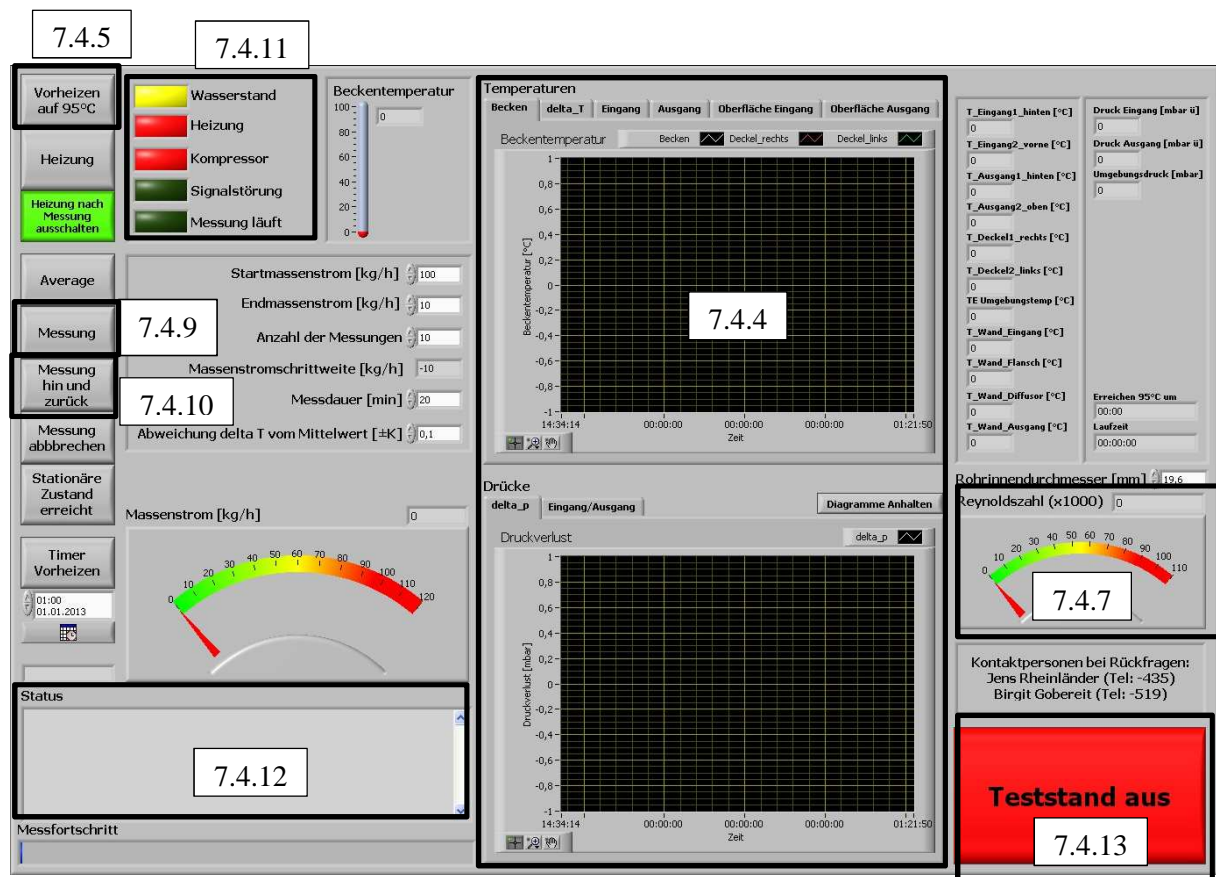


Abb. 12: Bedienoberfläche des LabVIEW-Programms

Darüber hinaus gibt es auf der Oberfläche manuell einstellbare Parameter, die im Folgenden kurz erläutert werden.

- „*Heizung nach Messung ausschalten*“ (Ein/Aus):

In der Regel wird die Heizung nach der Messung abgeschaltet. Je nach Arbeitsplanung ist kann es sinnvoll sein, dass die Heizung nicht ausgeschaltet wird.

- „*Average*“ (Ein/Aus):

Mittelung der Ein- und Ausgangstemperaturen über vier Messwerte zur Minimierung von Rauschen.

- „*Messung hin und zurück*“ (Ein/Aus):

Die Messung startet beim Startmassenstrom, läuft dann zum Endmassenstrom als Wendepunkt und endet dann wieder beim Startmassenstrom (siehe 7.4.10).

- „*Startmassenstrom*“:

Massenstrom, bei dem die automatische Messreihe startet.

- „*Endmassenstrom*“:

Massenstrom, bei dem die automatische Messreihe endet bzw. bei dem umgekehrt wird, wenn „Messung hin und zurück“ (siehe 7.4.10) erfolgen soll.

- „*Anzahl der Messung*“:

Anzahl der Messwerte vom Start- zum Endmassenstrom.

- „*Messdauer*“:

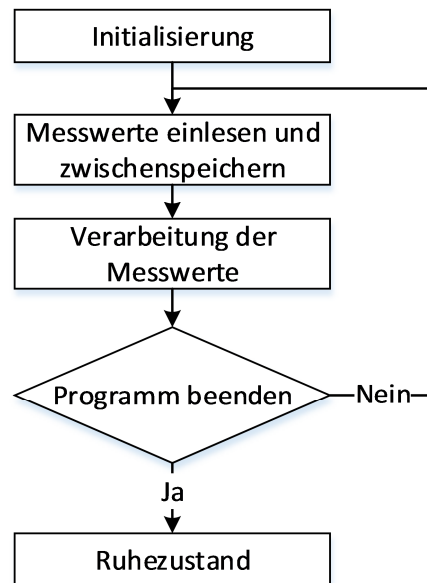
Zeit, in der das Abweichungskriterium erfüllt sein soll und über den die jeweiligen Messwerte einer Messung gespeichert werden (siehe auch 7.4.9).

- „*Abweichung  $\Delta T$  vom Mittelwert*“:

Abweichungskriterium für stationären Zustand.

## 7.4 Programmbeschreibung

Die Rahmenstruktur der programmierten LabVIEW-Anwendung ist in Abb. 13 dargestellt.



**Abb. 13: Rahmenstruktur Programm**

Zuerst werden beim Aufruf des Programms alle benötigten Variablen (Zählvariablen, Pfadvariablen) initialisiert und Vorbelegungen (Standartwerte, Pfade der OPC-Server) vorgenommen. Die Messwertaufnahme erfolgt in einer while-Schleife, die sekundlich durchlaufen wird. Zunächst werden alle Messwerte eingelesen und in verschiedenen Arrays abgespeichert und Zustände bestimmter Anzeige- und Bedienelemente festgelegt. Anschließend erfolgt die Verarbeitung der Messwerte. Beim Beenden des Programms wird aus der while-Schleife gesprungen und der Teststand wird in den Ruhezustand gebracht. Im Ruhezustand liegen an allen analogen Ausgängen 0V an, folglich ist die Heizung aus und der Kompressor auf minimaler Drehzahl.

Nachfolgend sind verschiedene Teil-Prozeduren beschrieben, die für den automatischen Betrieb des Teststandes benötigt werden.

#### 7.4.1 Zugriff auf Ein- und Ausgabemodule

Der Zugriff auf die Messhardware erfolgt mit OPC<sup>1</sup>-Servern. Dies ist eine einheitliche Schnittstelle auf dezentrale Automatisierungskomponenten von verschiedenen Herstellern. [Dub07, S.T41] Jeder Hardware-Hersteller stellt für sein Produkt einen eigenen OPC-Server zur Verfügung. Die OPC-Server verwalten die Ein- und Ausgänge der jeweiligen Hardware.

Auf die OPC-Server wird mittels einer DataSocket-Funktion von LabVIEW zugegriffen.

Sollte eine Kommunikation nicht mit allen Kanälen möglich sein, leuchtet die „Signalstörung“-LED auf der Benutzeroberfläche (Abb. 12, 7.4.10) orange.

Beim Einrichten des ICPCON-OPC-Servers muss die richtige COM-Port-Adresse<sup>2</sup> der verwendeten USB-Schnittstelle verwendet werden.

Die Verbindung mit der LogMessage500 erfolgt mit einem CrossOver-Kabel und über die Angabe der IP-Adresse und der DNS-Server-Adresse in den Netzwerk-Einstellungen des Messrechners.

#### 7.4.2 Zwischenspeichern der Messwerte

Die aufgenommen Messwerte werden in verschiedenen Arrays zwischengespeichert. Die Arrays lassen sich in zwei Gruppen unterteilen.

Gruppe I: Beinhaltet Messwerte aus unterschiedlichen Quellen zum aktuellen Zeitpunkt.

Gruppe II: Beinhaltet Messwerte von der gleichen Quelle innerhalb der eingestellten Messdauer.

Die Arrays der Gruppe I werden bei jedem while-Schleifendurchlauf überschrieben.

Bei Arrays der Gruppe II wird bei jedem while-Schleifendurchlauf das letzte Element gelöscht und vor die erste Stelle der aktuelle Wert hinzugefügt. Beim Starten des Programms ist das Array komplett leer. Folglich werden anfangs so lange Werte hinzugefügt, bis die eingestellte Anzahl an Messwerten erreicht ist. Die Anzahl der Messwerte im Array richtet sich nach der eingestellten Messdauer (siehe Kapitel 7.3).

---

<sup>1</sup> OPC- Object Linking and Embedding (OLE) for Process Control: standardisierte Softwareschnittstelle in Automatisierungstechnik

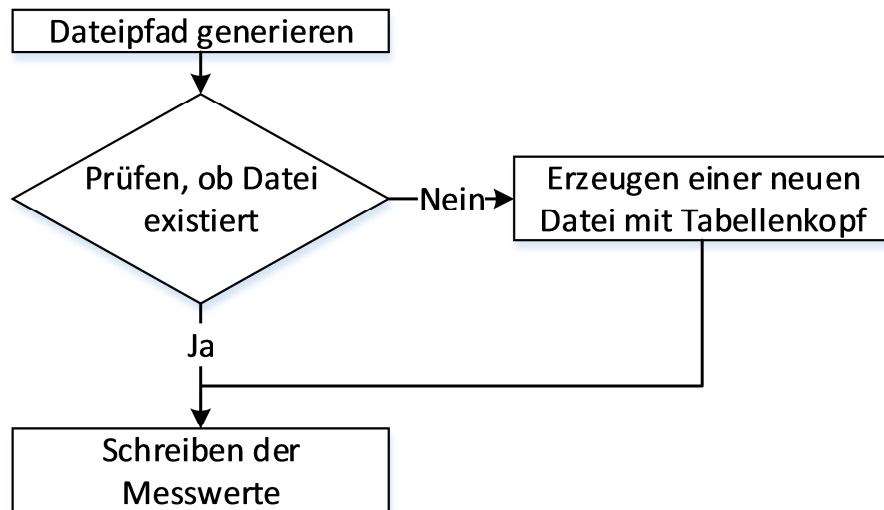
<sup>2</sup> COM-Port: „communication port“, serielle Schnittstelle; COM-Port-Adresse: COM1, COM2... im Hardware-Manager hinterlegt



### 7.4.3 Abspeichern der Messwerte

Während der kompletten Laufzeit des Programms werden sekundlich alle Messdaten in eine \*.txt-Datei geschrieben. Des Weiteren werden nach Erreichen eines stationären Zustands die Messwerte der jeweiligen Messung, die in einem Ringspeicher zwischengespeichert sind, in eine separate \*.txt-Datei geschrieben.

Der Ablauf dieser beiden Speicherzyklen ist in Abb. 14 dargestellt.



**Abb. 14: Ablauf Messwertspeicherung**

Zuerst wird der Dateipfad festgelegt. Die Datei, in die alle Messwerte geschrieben werden hat folgenden Dateinamen:

[Jahr]\_[Monat]\_[Tag]\_Messung.txt

Folglich wird je Tag eine neue Datei angelegt.

Der Dateiname für die jeweilige Messung ist folgendermaßen aufgebaut:

[Jahr]\_[Monat]\_[Tag]\_\_[Stunde]\_[Minute]\_Messung\_[Massenstrom].txt

Durch die Uhrzeit im Dateinamen werden mehrere Messungen mit gleichem Massenstrom an einem Tag in separaten Dateien gespeichert.

Nachdem der Pfad generiert wurde, wird geprüft, ob dieser bereits existiert. Sollte dies nicht der Fall sein, wird eine neue Datei mit Spaltenbeschriftungen (Typ und Einheit) generiert. Bei der Datei für einen jeweiligen Massenstrom wird zusätzlich die Konfiguration in die ersten Zeilen der Datei geschrieben.

Anschließend werden in die Datei zeilenweise Datensätze für jede Sekunde hinzugefügt. Die Datensätze werden aus den verschiedenen Arrays bereitgestellt.

#### 7.4.4 Visualisierung der Messwerte

Um den zeitlichen Verlauf der relevanten Größen während der Messung verfolgen zu können, werden Temperaturen und Drücke in xy-Grafen visualisiert (Abb. 12, Mitte).

Die Anschlussblöcke der Grafen sind innerhalb einer Bedingungs-Struktur, damit ein Zoomen während des laufenden Programms möglich ist. Die Schaltfläche „Diagramme Anhalten“ steuert die Bedingung. Ist diese Schaltfläche nicht gedrückt, werden die Grafen aktualisiert. Ist diese Schaltfläche gedrückt, dann werden die Grafen nicht weiter aktualisiert.

#### 7.4.5 Funktion: Vorheizen auf 95°C

Durch betätigen der Schaltfläche „Vorheizen auf 95°C“ wird die Heizung so lange eingeschaltet, bis eine Beckentemperatur von 95°C erreicht ist. Das Vorheizen kann mittels der „Timer“-Schaltfläche zu einem späteren Zeitpunkt gestartet werden.

Die Startzeitvorgabe ist auf sieben Tage in der Zukunft begrenzt.

Im rechten Bereich der Oberfläche befindet sich eine Uhrzeit-Prognose für das Erreichen der 95°C, wenn zum momentanen Zeitpunkt die Heizung eingeschaltet wäre.

Die Prognose wird aus der Differenz zwischen 95°C und der momentanen Beckentemperatur berechnet, die mit einem Faktor multipliziert wird. Die ermittelte Zeit wird zur momentanen Uhrzeit hinzuaddiert und ausgegeben. Der Faktor (0.012 K/s) wurde aus mehreren Aufheizvorgängen berechnet.

Wenn der Timer für das Vorheizen auf 95°C aktiviert ist, wird das eingestellte Datum und die eingestellte Uhrzeit mit den Systemzeiten verglichen. Zum eingestellten Starttermin wird die Schaltfläche „Vorheizen auf 95°C“ automatisch aktiviert und der Teststand beginnt mit Heizen.

#### 7.4.6 Massenstromregelung

Über die Kompressorsteuerung kann die Drehzahl mittels eines analogen Signals zwischen 0 und 10V eingestellt werden. Mit Hilfe eines PID-Reglers erfolgt die Massenstromregelung. Als Eingangsgrößen benötigt der Regler Sollwert (einzustellende Massenstrom), Istwert (aktuelle gemessene Massenstrom), Reglerkoeffizienten ( $K_c$ ,  $T_i$  und  $T_d$ ) und Intervall des PID-Aufrufes. Die Ermittlung der Reglerkoeffizienten ist in Kapitel 6 beschrieben. Der PID-Regler gibt dann einen Stellwert aus, welcher anschließend umgerechnet und als analoges Signal ausgegeben wird. Mittels einer Wertebereichsprüfung des auszugebenden Signals wird gewährleistet, dass das Ausgangssignal immer zwischen 0 und 10V liegt.

#### 7.4.7 Reynoldszahlberechnung

Die Reynoldszahl wird mit Hilfe eines Formelknotens im Programm berechnet. In den Formelknoten werden die aktuelle mittlere Temperatur, der Rohrinnendurchmesser und der aktueller Massenstrom übergeben. Ausgegeben wird die berechnete momentane Reynoldszahl, welche dann auf einem Anzeigeelement angezeigt wird. Die notwendigen Formeln werden mit einer C-ähnlichen Syntax in den Formelknoten eingetragen. Im Formelknoten steht Formel (15) zur Reynoldszahlberechnung, welche sich aus Gleichung (12) [Sig12, S.85] mit Gleichung (13) [Sig12, S.69] und (14) [Sig12, S.69] ergibt.

$$Re = \frac{c \cdot d}{\nu} \quad (12)$$

$$c = \frac{\dot{V}}{A} = \frac{4 \cdot \dot{V}}{\pi \cdot d^2} \quad (13)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (14)$$

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m} \cdot d}{\nu \cdot \rho \cdot \pi \cdot d^2} \quad (15)$$

Die kinematische Viskosität  $\nu$  und Dichte  $\rho$  wird mit der entsprechenden Formel aus Kapitel 4.1 berechnet.

Bei den Formeln innerhalb des Formelknotens ist darauf zu achten, dass mit „pow([Basis],[Exponent])“ exponenziert wird und dass am Ende jeder Zeile ein Semikolon steht.

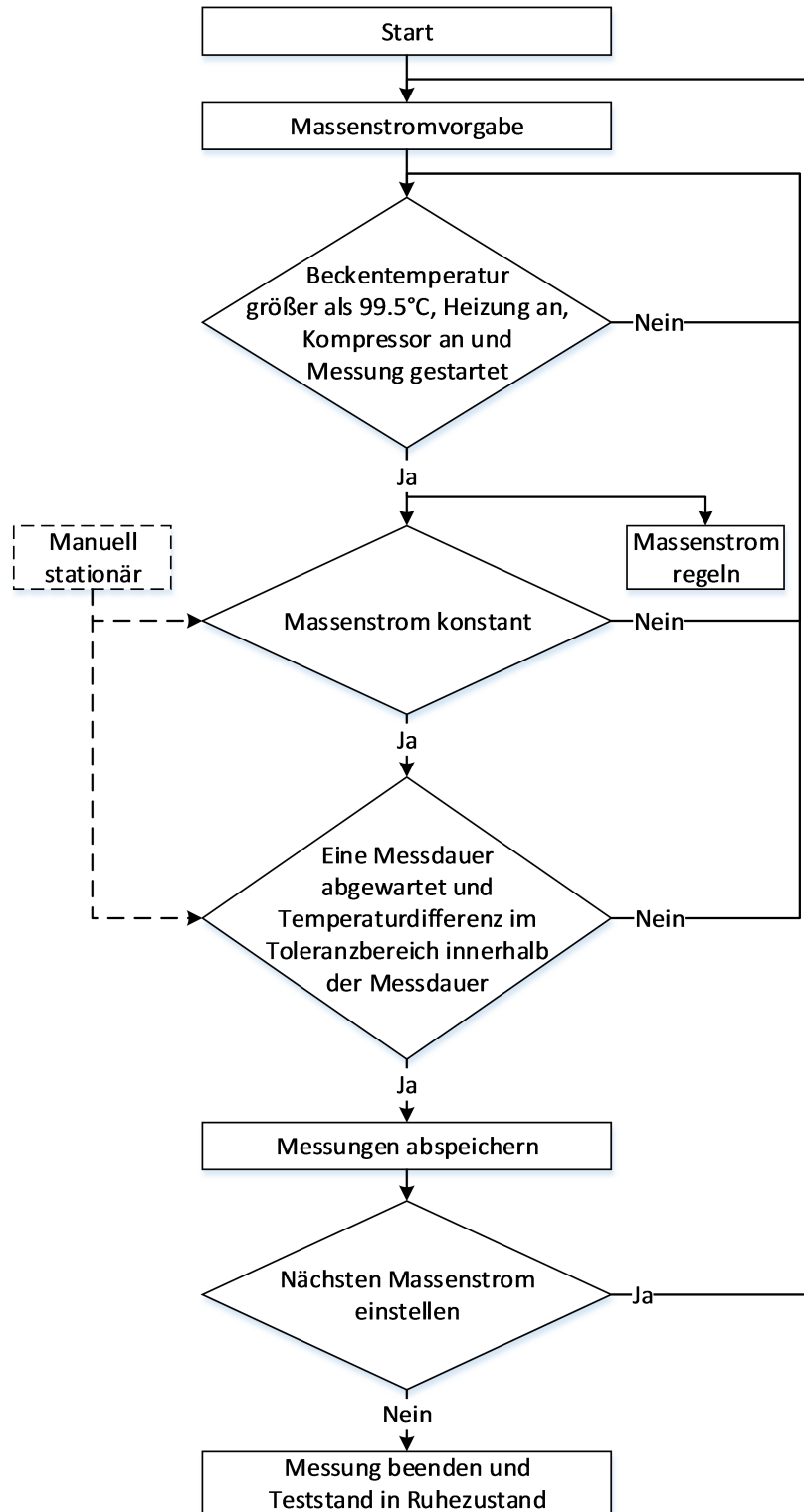
#### 7.4.8 Flüssigkeitsüberwachung

Der Flüssigkeitsstand wird mittels eines kapazitiven Flüssigkeitssensors überwacht. Sobald dieser 0V (zu wenig Flüssigkeit) ausgibt, wird die Heizung über das Relais nach spätestens 15min abgeschaltet. Wenn gerade nicht gemessen wird, dann schaltet das Relais die Heizung sofort aus. Das Programm schaltet die Heizung mit Hilfe des Relais automatisch wieder ein, sobald Wasser nachgefüllt ist.

#### 7.4.9 Messsteuerung

Die Messsteuerung wird durchlaufen, wenn die Schaltfläche „Messung“ aktiviert ist.

Der Ablauf der Messsteuerung ist in Abb. 15 dargestellt.



**Abb. 15: Ablauf Messaufnahmesteuerung**

Als erstes wird ein Massenstromwert vorgegeben.

Anschließend werden folgende Kriterien geprüft:

- Beckentemperatur größer als  $99.5^{\circ}\text{C}$
- Heizung an
- Kompressor an
- Schaltfläche „Messung“ gedrückt

Bei erfolgreicher Prüfung wird der Massenstrom eingestellt und geprüft, ob dieser konstant ist.

Ist dies der Fall, dann wird die Temperaturdifferenz als Kriterium für den stationären Zustand geprüft. Die Temperaturdifferenz darf innerhalb der vorgegebenen Messdauer nur um eine vorgegebene Größe vom Mittelwert abweichen. Vor dem Abspeichern der Werte wird noch eine komplette Messdauer abgewartet, damit nur Messwerte mit dem aktuell eingestellten Massenstrom berücksichtigt werden.

Sollte eines der Kriterien nicht erfüllt sein, wird die komplette Abfrage innerhalb der while-Schleife erneut durchgeführt. Sind alle Kriterien erfüllt, werden die Messwerte für den jeweiligen Massenstrom abgespeichert.

Sollte das Temperaturdifferenzkriterium (z.B. durch Signalrauschen) nicht erfüllt werden, besteht die Möglichkeit, mittels der Schaltfläche „Stationäre Zustand erreicht“ die Kriterien zu umgehen und unmittelbar die Messwerte abzuspeichern.

Als nächstes wird der nächste Massenstrom vorgegeben, bis die Messserie beendet ist.

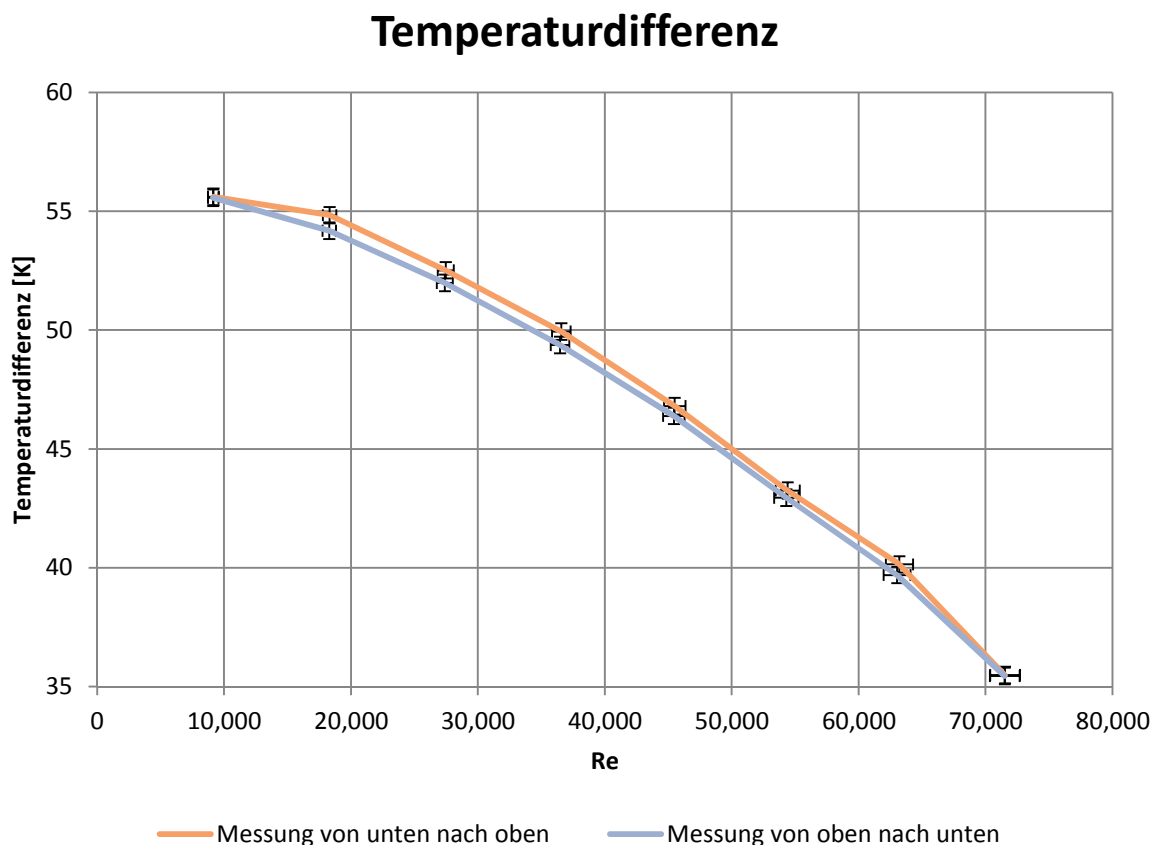
Nach Abschluss der Messserie wird der Teststand in den Ruhezustand (minimale Kompressordrehzahl, Heizung aus) gebracht.

#### 7.4.10 Funktion: Messung hin und zurück

Bei aktivierter Schaltfläche „Messung hin und zurück“ wird die Anzahl der Messungen verdoppelt.

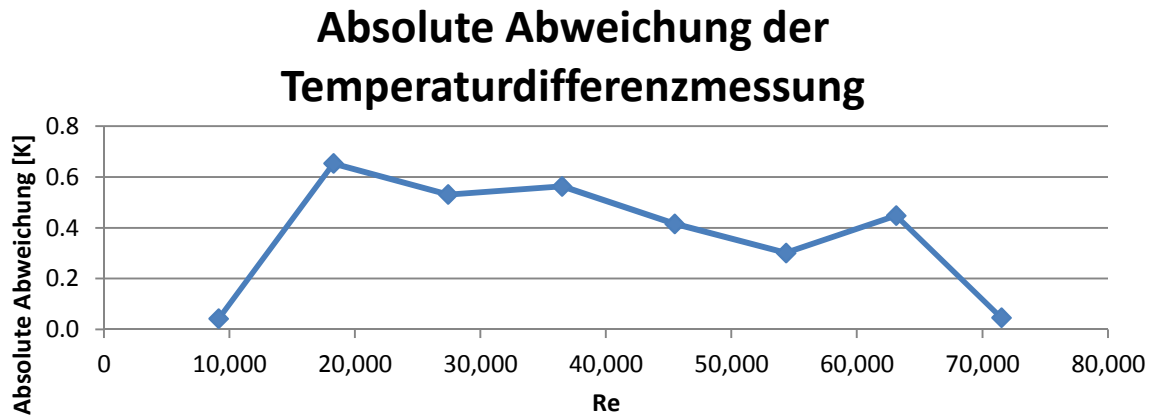
Die Messreihe wird zunächst vom Startmassenstrom zum Endmassenstrom in den vorgegebenen Schritten durchgeführt. Anschließend wird die Messreihe noch einmal in umgekehrter Reihenfolge durchlaufen. Dies ist eine einfache Möglichkeit zur Überprüfung, ob die Konvergenzkriterien für die gewünschte Genauigkeit der Messungen passend sind. Die systematische Abweichung der Messung ergibt sich dann aus der Differenz.

Abb. 16 zeigt die Temperaturdifferenz, bei einer solchen Messreihe. Zu erkennen ist, dass die Kurven voneinander etwas abweichen.



**Abb. 16: Hysterese Temperaturdifferenz**

Die absolute Abweichung ist in Abb. 17 dargestellt.



**Abb. 17: Absolute Abweichung der Temperaturdifferenzmessung**

Bei den hier vorgegebenen Konvergenzkriterien für die Messung wäre also mit einer systematischen Abweichung der Ergebnisse  $< 0.7K$  zu rechnen. Dies entspricht einem Hysteresefehler der Temperaturdifferenz von ca. 2%.

#### 7.4.11 Signalanzeigen

Nachfolgend werden die fünf Signalleuchten der Oberfläche (Abb. 12 oben links) beschrieben.

- *Wasserstand:*

Wenn genügend Flüssigkeit im Becken ist, dann ist das Signal des kapazitiven Flüssigkeitssensors aufgrund der Verschaltung 4.6V. Wenn der Wasserspiegel zu niedrig ist, dann ist das Signal 0V. Im Programm wird das Signal verglichen, ob es größer oder kleiner als 2V ist.

- *Heizung:*

Diese Anzeige ist grün, wenn die Heizung an ist, ansonsten rot.

- *Kompressor:*

Der Massenstrom bei minimaler Drehzahl des Kompressors ist ca. 8 kg/h. Die Anzeige ist grün, wenn der Massenstrom größer als 5 kg/h ist.

- *Signalstörung:*

Wenn beim Lesen eines analogen Eingangs mit der DataSocket-Funktion ein Fehler auftritt, dann ist die Anzeige rot.

- *Messung läuft:*

Diese Anzeige fängt an zu leuchten, nachdem ein Massenstrom eingestellt und anschließend mindestens eine Messdauer gewartet wurde.

#### 7.4.12 Statusmeldungen

In der Statusausgabe (Abb. 12 unten links) werden Zeilenweise Statusmeldungen ausgegeben.

Folgende Meldungen erscheinen mit vorangestellter Uhrzeit:

- „*Begin Vorheizen*“:

Erscheint wenn durch Timer Vorheizen eingeschaltet wird.

- „*Heizvorgang auf 95°C beendet!*“:

Erscheint, wenn Vorheizendtemperatur erreicht ist.

- „*Heizvorgang auf 95°C abgebrochen!*“:

Erscheint, wenn Vorheizen abgebrochen wird.

- „*Messung mit [x]kg/h beendet*“:

Erscheint, wenn stationäre Zustand anhand der eingestellten Kriterien erreicht wurde und Messungen abgespeichert wurden.

- „*Messungen sind fertig!*“:

Erscheint, wenn eingestellte Messserie fertig ist.

#### 7.4.13 Ausschalten des Teststandes

Der Teststand wird mit der Schaltfläche „Teststand Aus“ in den Ruhezustand versetzt. Die Heizung wird ausgeschaltet und der Kompressor auf minimale Drehzahl gestellt. Als letztes wird dann das Programm geschlossen.



## 8. Bestimmung der Messunsicherheiten

Nachfolgend wird die Messungenauigkeiten für die verwendete Messhardware nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz (Formel (16)) [Dub07, S. W5] bestimmt. Hierbei ist  $y = f(A, B, \dots)$  die Berechnete Größe aus den Messwerten und  $u$  ist die jeweilige Messunsicherheit.

Die ermittelten Ungenauigkeiten sind später in Diagrammen in Form von Fehlerkreuzen eingezeichnet.

$$u(y) = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial A} \cdot u(A)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial B} \cdot u(B)\right)^2 + \dots} \quad (16)$$

### 8.1 Messunsicherheit bei der Reynoldszahlberechnung

Mit Hilfe von Gleichung (17) wird die Reynoldszahl berechnet.

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}}{\nu \cdot \rho \cdot \pi \cdot d} \quad (17)$$

Der Fehler der Reynoldszahl bestimmt sich mit Gleichung (18).

$$u(Re) = \frac{4}{\pi} \cdot \sqrt{\left(\frac{u(\dot{m})}{\nu \cdot \rho \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{\dot{m} \cdot u(\nu)}{\nu^2 \cdot \rho \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{\dot{m} \cdot u(\rho)}{\nu \cdot \rho^2 \cdot d}\right)^2 + \left(\frac{\dot{m} \cdot u(d)}{\nu \cdot \rho \cdot d^2}\right)^2} \quad (18)$$

Die Messunsicherheit  $u(\dot{m})$  ist abhängig vom Massenstrommesser. Laut Spezifikation beträgt die Messgenauigkeit  $\pm 0.8\%$  vom Messwert  $\pm 0.2\%$  vom Endwert. Der Endwert ist  $150 \text{ m}^3/h$ . Hinzu kommt noch die Unsicherheit der LogMessage500 von  $0.01\%$  vom Messbereich (siehe Kapitel 7.1).

Somit ergibt sich Formel (19).

$$u(\dot{m}) = 0.008 \cdot \dot{m} + 0.002 \cdot 150 \frac{\text{m}^3}{h} \cdot 1.1885 \frac{kg}{\text{m}^3} + 0.0001 \cdot 194.1 \frac{kg}{h} \quad (19)$$

Die Unsicherheiten der Stoffkennwerte  $\nu$  und  $\rho$  ergeben sich aus Gleichung (20) und Gleichung (21).

$$u(\nu) = (2 \cdot 9.73 \cdot 10^{-4} \cdot \vartheta_m + 9.02 \cdot 10^{-1}) \cdot u(\vartheta_m) \quad (20)$$

$$u(\rho) = |-1.0003 \cdot 348.81 \cdot (\vartheta_m + 273.15)^{-2.0003} \cdot u(\vartheta_m)| \quad (21)$$

Die Temperaturunsicherheiten  $u(\vartheta_m)$  ist abhängig von den Unsicherheiten der Temperaturmessung. Diese besteht aus der Genauigkeit der Pt100-Widerstandsthermometer ( $u = 0.15 + 0.002 \cdot \vartheta$ ) und der Genauigkeit des Messwerterfassungssystems ( $u = 0.1K$ ) (siehe Kapitel 7.1).

Mittels Formel (22) in Verbindung mit Formel (23) wird diese Messunsicherheit berechnet.

$$u(\vartheta_m) = \sqrt{\left(\frac{u(\vartheta_{Ein})}{2}\right)^2 + \left(\frac{u(\vartheta_{Aus})}{2}\right)^2} \quad (22)$$

$$u(\vartheta_{Ein/Aus}) = \sqrt{\left(\frac{0.15 + 0.002 \cdot \vartheta_1 + 0.1}{2}\right)^2 + \left(\frac{0.15 + 0.002 \cdot \vartheta_2 + 0.1}{2}\right)^2} \quad (23)$$

$\vartheta_1$  und  $\vartheta_2$  sind die beiden Temperaturmessstellen am Ein- bzw. Auslass zwischen denen gemittelt wird.

Der Fehler des Durchmessers  $u(d)$  beträgt  $0.2mm$  [TMe08, S. 110].

Im unteren Reynoldszahlbereich bei  $Re = 10,000$  ist  $u(Re) < 5\%$ . Mit steigender Reynoldszahl wird  $u(Re) < 2\%$  (ab  $Re \approx 40,000$ ).

## 8.2 Messunsicherheit bei der Druckverlustmessung

Bei der Druckverlustmessung wird die Differenz zwischen den beiden Drucksensoren berechnet. Die Druckmesser haben nur eine prozentuale Abweichung vom Endwert und nicht vom Messwert (Siehe Kapitel 7.1). Nach Gleichung (24) lässt sich die Ungenauigkeit der Druckverlustmessung bestimmen.

$$u(\Delta p) = \sqrt{2} \cdot (0.0025 \cdot 250mbar + 0.0001 \cdot 250mbar) = 0.9mbar \quad (24)$$

Da die Sensoren einen absoluten Messfehler bezogen auf den Endwert haben, ist die absolute Unsicherheit der Messungen im unteren Reynoldszahlen-Bereich in der Größenordnung der Messergebnisse. Ab einem Druckverlust von  $10bar$  wird der relative Messfehler kleiner als  $10\%$ . Beim Glattrohr wird dieser Fall ab  $Re \approx 40,000$  erwartet. Bei strukturierten Rohren tritt dieser Fall bereits bei einer geringeren Reynoldszahl auf, da dort der Druckverlustanstieg größer ist als beim Glattrohr. Bei den in Kapitel 12 diskutierten Rohren tritt dies spätestens ab  $Re \approx 20,000$  ein.

Die im folgenden diskutierten Messungen haben einen Druckverlust im Bereich von ca.  $1mbar$  bis  $200mbar$ .

### 8.3 Messunsicherheit bei der Wärmestrombestimmung aus der Messung

Die Ausgangsformel für die Fehlerrechnung des Wärmestromes ist Gleichung (25).

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (25)$$

Nach dem Gauß'schen Fehlerfortpflanzungsgesetz, lässt sich der Fehler der Wärmestromrechnung mit Formel (26) bestimmen.

$$u(\dot{Q}) = \sqrt{\left(c_p \cdot \Delta T \cdot u(\dot{m})\right)^2 + \left(\dot{m} \cdot \Delta T \cdot u(c_p)\right)^2 + \left(\dot{m} \cdot c_p \cdot u(\Delta T)\right)^2} \quad (26)$$

Der Fehler des Massenstromes  $u(\dot{m})$  wurde bereits in Kapitel 8.1 (Formel (19)) bestimmt.

Der Fehler der spezifischen Wärmekapazität wird mit Gleichung (27) bestimmt ( $u(\vartheta_m)$  siehe Formel (22)).

$$u(c_p) = (2 \cdot 4.09 \cdot 10^{-7} \cdot \vartheta_m + 1.5 \cdot 10^{-5}) \cdot 10^3 \cdot u(\vartheta_m) \quad (27)$$

Mittels Formel (28) wird der Fehler der Temperaturdifferenzbestimmung ermittelt ( $u(\vartheta_{Ein/Aus})$  siehe Formel (23)). Der Fehler setzt sich aus den Messungenauigkeiten der Messsensoren und einem systematischen Fehler, der aus der Hysterese mit 2% von  $\Delta T$  bestimmt wurde (siehe Kapitel 7.4.10).

$$u(\Delta T) = \sqrt{\left(u(\vartheta_{Ein})\right)^2 + \left(u(\vartheta_{Aus})\right)^2} + 0.02 \cdot \Delta T \quad (28)$$

Im unteren Reynoldszahlbereich bei  $Re = 10,000$  ist  $u(\dot{Q}) < 6\%$ . Mit steigender Reynoldszahl wird  $u(\dot{Q}) < 4\%$  (ab  $Re \approx 40,000$ ).

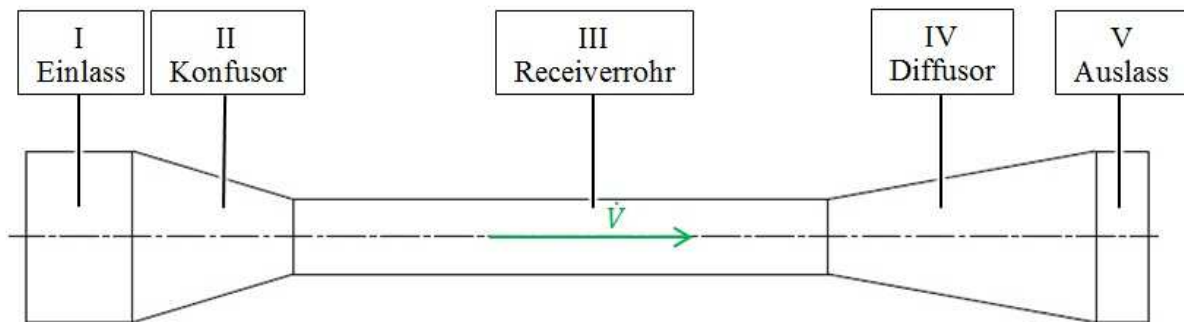
Die größere Abweichung im unteren Reynoldszahlbereich beim Wärmestrom und der Reynoldszahlberechnung wird hauptsächlich durch die Messungenauigkeit des Massenstrommessers verursacht.

## 9. Bestimmung des Druckverlustes im Testrohr

Zur Bestimmung des Druckverlustes am Receiverrohr muss der zusätzliche Druckverlust am Ein- und Auslass vom gesamt gemessenen Druckverlust abgezogen werden.

In der Praxisarbeit T3000 wurde bereits gezeigt, dass es möglich ist, den zusätzlichen Druckverlust relativ zuverlässig zu berechnen. [RhJ13, S. 18]

Abb. 18 zeigt eine Abschnittseinteilung für die Druckverlustrechnung.



**Abb. 18: Abschnittseinteilung für Druckverlustrechnung**

Für die Bereiche I, III und V lässt sich aus der erweiterten Energiegleichung (Formel (29)) [Sig12, S. 131] Formel (30) zur Druckverlustberechnung herleiten, siehe dazu auch T3000-Arbeit [RhJ13, S. 12-13]. Bei der Variablenindizierung ist „1“ der Beginn eines Abschnittes und „2“ das Ende eines Abschnittes.

$$g \cdot z_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{c_1^2}{2} = g \cdot z_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{c_2^2}{2} + Y_{V,12} \quad (29)$$

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \cdot \frac{Re^2}{d^2 \cdot 2} \cdot \left[ \zeta \cdot \frac{l}{d} \cdot v_m^2 + (v_2^2 - v_1^2) \right] \quad (30)$$

Die Rohrreibungszahl  $\zeta$  wird in Abhängigkeit von der Reynoldszahl mit Gleichung (31), Gleichung (32) oder Gleichung (33) berechnet. [VDI06, S. Lab1]

$$Re < 2,320 \quad \zeta = \frac{64}{Re} \quad (31)$$

$$2,320 < Re < 10,000 \quad \zeta = \frac{0.3164}{\sqrt[4]{Re}} \quad (32)$$

$$Re > 10,000 \quad \zeta = (1.8 \cdot \log Re - 1.5)^{-2} \quad (33)$$

Der Druckverlust für den Konfusor (II) ergibt sich mit Hilfe von Gleichung (34) [VDI06, S. Lac 2].

$$\Delta p_{Konfusor} = 0.04 \cdot \frac{\rho \cdot c_2^2}{2} \quad (34)$$

Der Druckverlust am Diffusor (IV) kann mit Gleichung (35) [VDI06, S. Lac3] berechnet werden.

$$\Delta p_{\text{Diffusor}} = \zeta' \cdot \left(1 - \frac{A_1}{A_2}\right)^2 \cdot \frac{\rho \cdot c_1^2}{2} \quad (35)$$

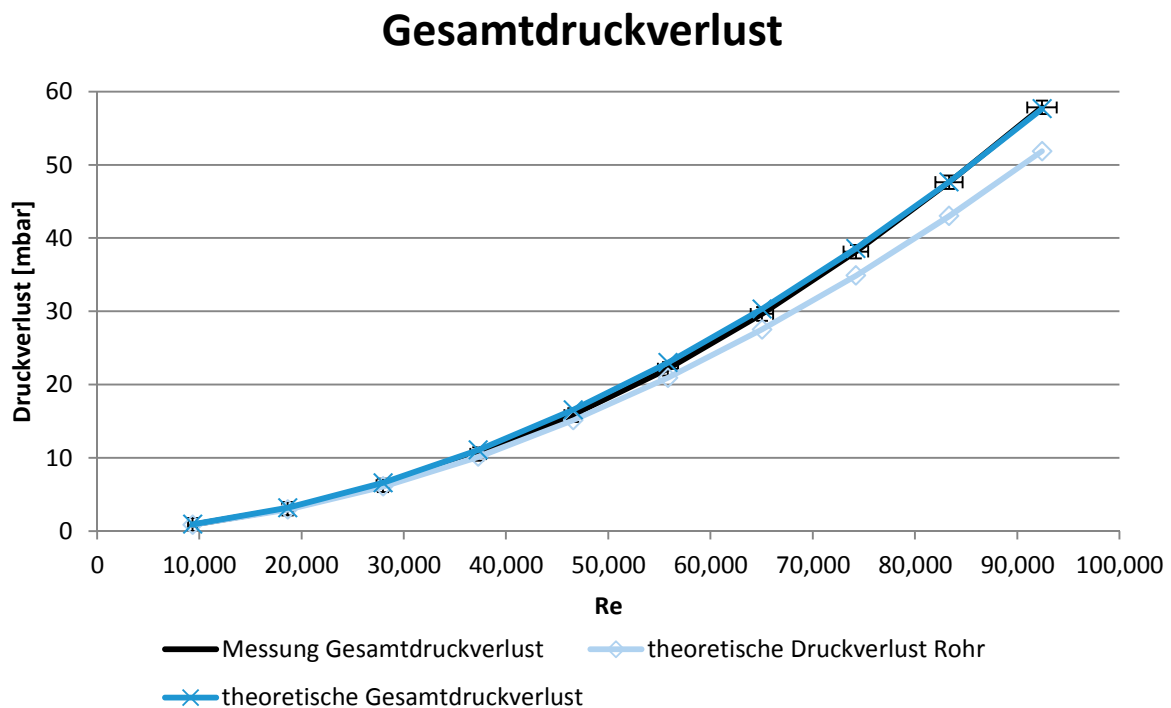
In der T3000-Arbeit wurde  $\zeta' = 0.2$  bestimmt. [RhJ13, S. 17]. Dieser Wert wird auch hier verwendet.

Die Strömungsgeschwindigkeit  $c$  lässt sich mit Formel (36) [Sig12, S. 85] berechnen.

$$c = \frac{Re \cdot \nu}{d} \quad (36)$$

Durch Addition der Druckverluste in den Bereichen I, II, IV und V wird der zusätzliche Gesamtdruckverlust bestimmt.

In Abb. 19 ist der gemessene Gesamtdruckverlust im Vergleich zum theoretisch berechneten Wert dargestellt. Es deutlich zu sehen, dass der theoretische Druckverlust am Rohr geringer ist, als der gemessene Druckverlust.



**Abb. 19: Vergleich Gesamtdruckverlust Messung mit Theorie**

Bei Berücksichtigung des zusätzlichen Druckverlustes ist die Abweichung zwischen den berechneten Werten und den Werten aus dem Experiment kleiner als 5%. Der Druckverlust im Rohr kann also durch Abzug der theoretisch berechneten Druckverluste in Bereich I, II, IV und V mit ausreichender Genauigkeit bestimmt werden.

## 10. Reduzierung des zusätzlichen Wärmeeintrages

Für die Bestimmung des Wärmestromes ist die Temperaturdifferenz der Luft zwischen Testrohrenlass und –auslass relevant. Die Temperaturmessstellen des Teststandes befinden sich vor dem Konfusor und nach dem Diffusor wie in Abb. 20 zu sehen ist.

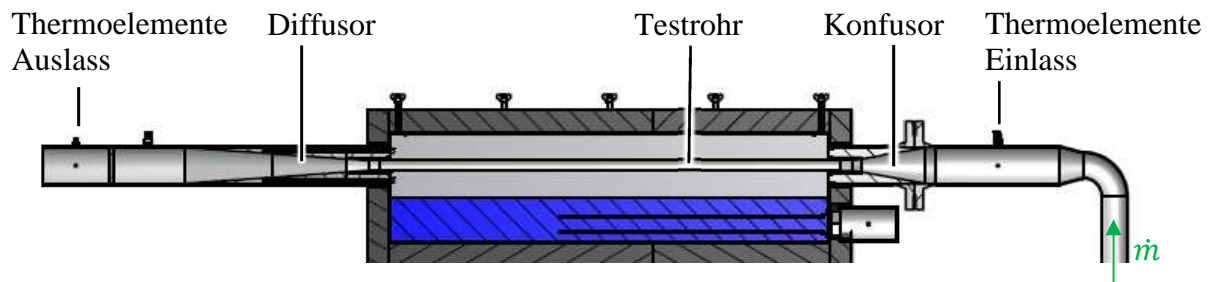


Abb. 20: Position Thermoelemente

Die gemessene Temperaturdifferenz wird durch Erwärmung des Luftstromes im Testrohr sowie einen zusätzlichen Wärmeeintrag vor allem am Kon- und Diffusor hervorgerufen. Dies bestätigt eine im Folgenden beschriebene FEM-Berechnung.

### 10.1 FEM-Berechnung

Die FEM-Berechnung erfolgt mit der Ansys Workbench 14.5.7 [Ans14].

Für die FEM-Berechnung wurde die in Abb. 21 dargestellte Geometrie verwendet. Dies ist genau der Bereich, der zwischen den Thermoelementen an Ein- und Auslass liegt.

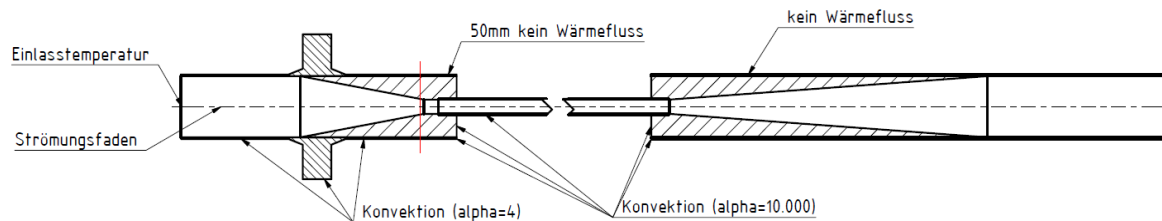
Nachfolgende Materialien wurden den entsprechenden Bauteilen zugewiesen:

- Kupfer: Receiverrohr
- Aluminium: Kon- und Diffusor
- Edelstahl: Ein- und Auslassrohr mit Flansch
- Luft: Strömungsmedium

Die Stoffdaten bezüglich der Wärmeleitfähigkeit, der spezifischen Wärmekapazität und der Dichte sind dem VDI-Wärmeatlas [VDI06] bzw. den entsprechenden Datenblättern entnommen. Diese sind im Berechnungsprogramm in Abhängigkeit von der Temperatur hinterlegt wurden.

### 10.1.1 Berechnungskonfiguration Ausgangszustand des Teststandes

Die Randbedingungen für die Berechnung sind in Abb. 21 dargestellt und in Tab. 1 aufgelistet.



**Abb. 21: FEM-Randbedingungen an Geometrie**

Randbedingung	Wert	Ort der Wirkung
Einlasstemperatur	Temperatur abhängig vom Lastfall	Mittelpunkt Einlassdurchmesser
Konvektion im Becken	$\alpha=10.000\text{W/m}^2\text{K}$ $T=100^\circ\text{C}$	Außenfläche Receiverrohr und angrenzende Seitenflächen des Kon- bzw. Diffusors
Konvektion außen am Einlass	$\alpha=4\text{W/m}^2\text{K}$ $T=23.5^\circ\text{C}$	Außenfläche Einlassrohr (inkl. Flansch)
Kein Wärmefluss (perfekt Isoliert)	$\dot{Q}=0\text{W}$	Isolierte Außenfläche des Auslassrohres und isolierter Bereich am Einlass
Massenstrom	Massenstrom abhängig vom Lastfall	Strömungsfaden
Kinematische Viskosität	Viskosität abhängig vom Lastfall	Strömungsfaden
Konvektion im Strömungsbereich	Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit von der Position und abhängig vom Lastfall berechnet mit Nu-Korrelationen	Innenwandflächen im Strömungsfadenbereich

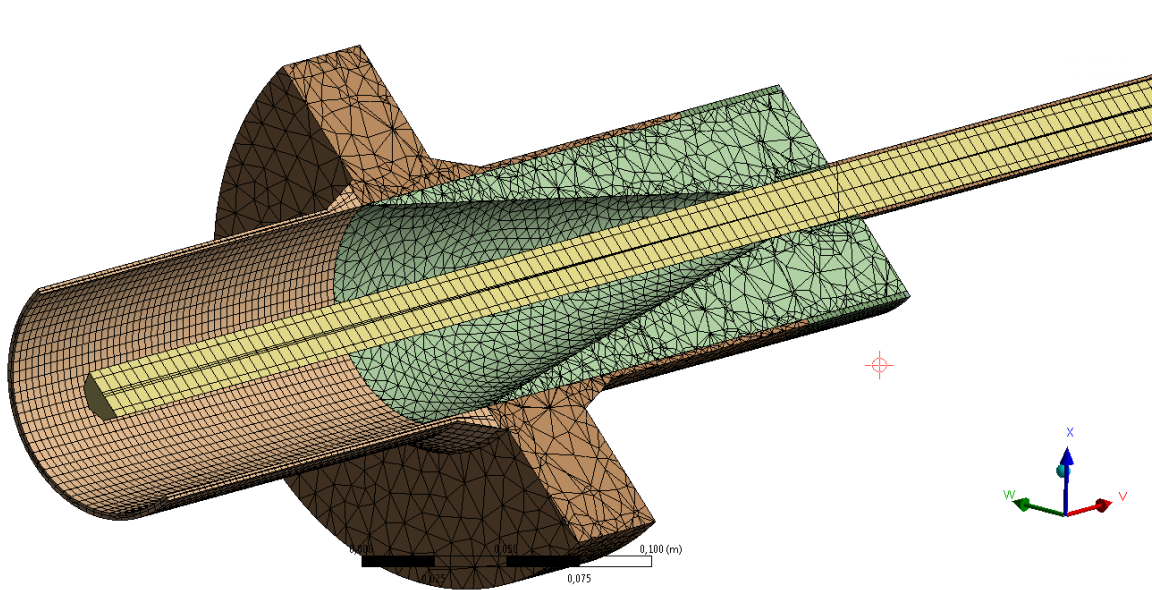
**Tab. 1: Randbedingungen FEM-Berechnung ursprünglicher Teststand**

Die in Tab. 2 aufgelisteten Lastfälle wurden mittels FEM betrachtet. Die Eingangstemperatur und der Massenstrom wurden aus den Experimenten entnommen und die jeweiligen Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  mit Hilfe der entsprechenden Nu-Korrelationen ermittelt [Siehe Kapitel 11].

Lastfall	<b>1 (10 kg/h)</b>	<b>2 (50 kg/h)</b>	<b>3 (100 kg/h)</b>
Massenstrom	$2.8 \cdot 10^{-3} \text{ kg/s}$	$1.4 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}$	$2.8 \cdot 10^{-2} \text{ kg/s}$
Eingangstemperatur	$25.0^\circ\text{C}$	$28.2^\circ\text{C}$	$33.6^\circ\text{C}$
Wärmeübergangskoeffizient			
Einlass	$1.1 \text{ W/m}^2\text{K}$	$10.4 \text{ W/m}^2\text{K}$	$17.9 \text{ W/m}^2\text{K}$
Konfusor	$4.3 \text{ W/m}^2\text{K}$	$24.6 \text{ W/m}^2\text{K}$	$42.2 \text{ W/m}^2\text{K}$
Receiverrohr	$39.0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$140.5 \text{ W/m}^2\text{K}$	$241.1 \text{ W/m}^2\text{K}$
Diffusor	$4.0 \text{ W/m}^2\text{K}$	$25.3 \text{ W/m}^2\text{K}$	$43.1 \text{ W/m}^2\text{K}$
Auslass	$1.3 \text{ W/m}^2\text{K}$	$10.6 \text{ W/m}^2\text{K}$	$18.3 \text{ W/m}^2\text{K}$

**Tab. 2: Lastfälle FEM-Berechnung**

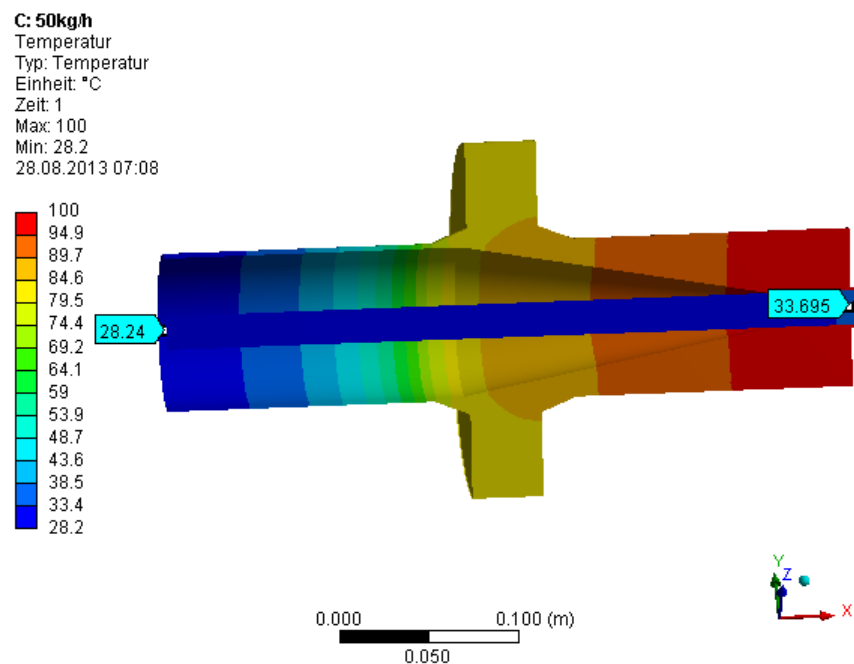
In Abb. 22 ist ein Ausschnitt des FE-Netzes abgebildet. Die maximale Elementgröße beträgt  $0.005\text{m}$ . Bei einer Verfeinerung des Netzes auf  $0.003\text{m}$  treten keine signifikanten Änderungen ( $< 0.2\%$ ) der Ergebnisse auf.



**Abb. 22: FE-Netz Einlassbereich**



Die Temperaturverteilung bei einem Massenstrom von  $50 \text{ kg/h}$  im Einlassbereich ist in Abb. 23 zu sehen.



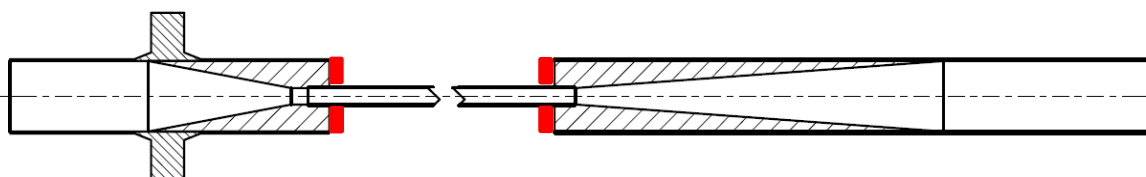
**Abb. 23: Temperaturverteilung Konfuser**

Es wird aufgrund der Temperaturverteilung ersichtlich, dass Wärme über die Stirnflächen des Konfusers an den Luftstrom im Einlassbereich weitergeleitet wird. Am Diffusor ist dies ebenfalls der Fall. Um diesen unerwünschten Wärmefluss zu minimieren, wird im Folgenden der Einsatz einer Isolierung an diesen Stellen untersucht.

#### 10.1.2 Berechnungskonfiguration mit Isolierung

Um zu untersuchen, ob und wie der zusätzliche Wärmestrom vermindert werden kann, wurden bei einer weiteren FEM-Simulation zusätzlich zwei Isolierscheiben vor dem Kon- bzw. Diffusor modelliert (Siehe Abb. 24, rote Flächen). Es wurden die gleichen Randbedingungen wie bei der Ausgangssimulation (Kapitel 10.1.1) verwendet.

Als Dicke der Isolierung wird  $20 \text{ mm}$  und als Wärmeleitfähigkeit wird  $0.1 \text{ W/m} \cdot \text{K}$  angenommen.

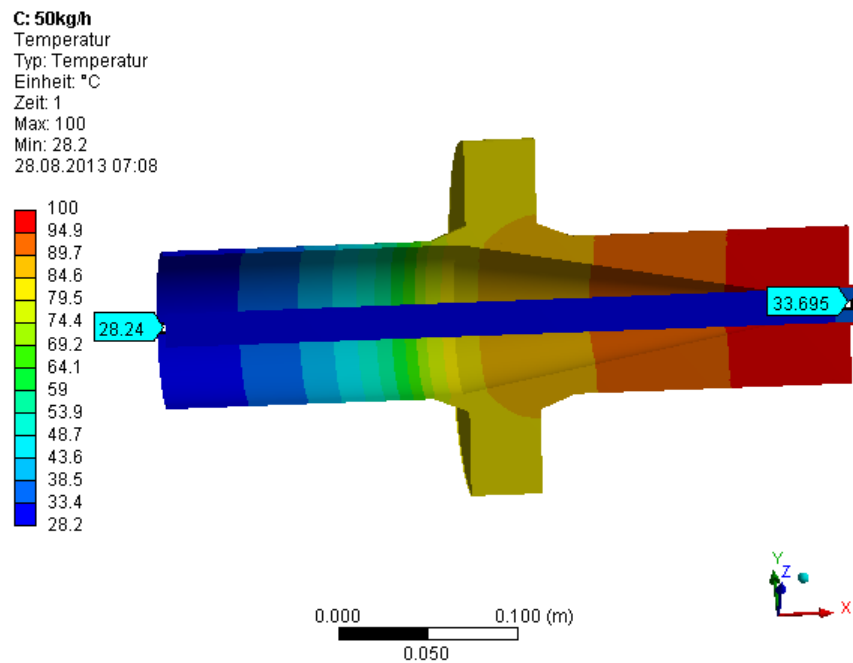


**Abb. 24: Position der Isolierung**

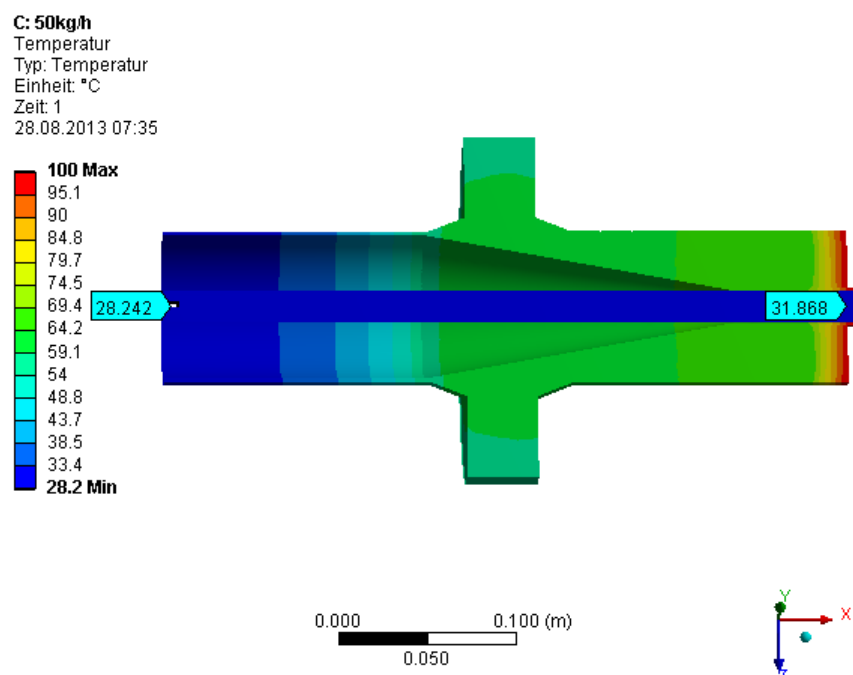
### 10.1.3 Diskussion der Ergebnisse

Exemplarisch wird der Lastfall 2 (50 kg/h) ausgewertet.

Abb. 25 zeigt die Temperaturverteilung am Einlass ohne Isolierung und Abb. 26 zeigt die Temperaturverteilung mit Isolierung.



**Abb. 25: Temperaturverteilung Einlass ohne Isolierung**



**Abb. 26: Temperaturverteilung Einlass mit Isolierung**

Es ist deutlich sichtbar, dass die Temperatur des Konfusors mit Isolierung deutlich geringer ist, als die ohne Isolierung. Dies ist auch im Auslassbereich so, wie Abb. 27 und Abb. 28 zeigen.

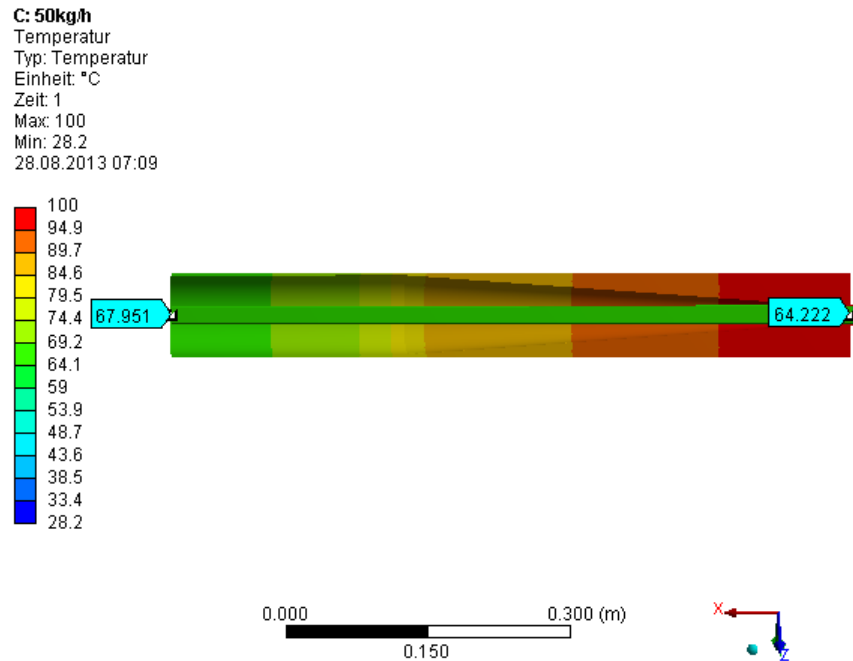


Abb. 27: Temperaturverteilung Auslass ohne Isolierung

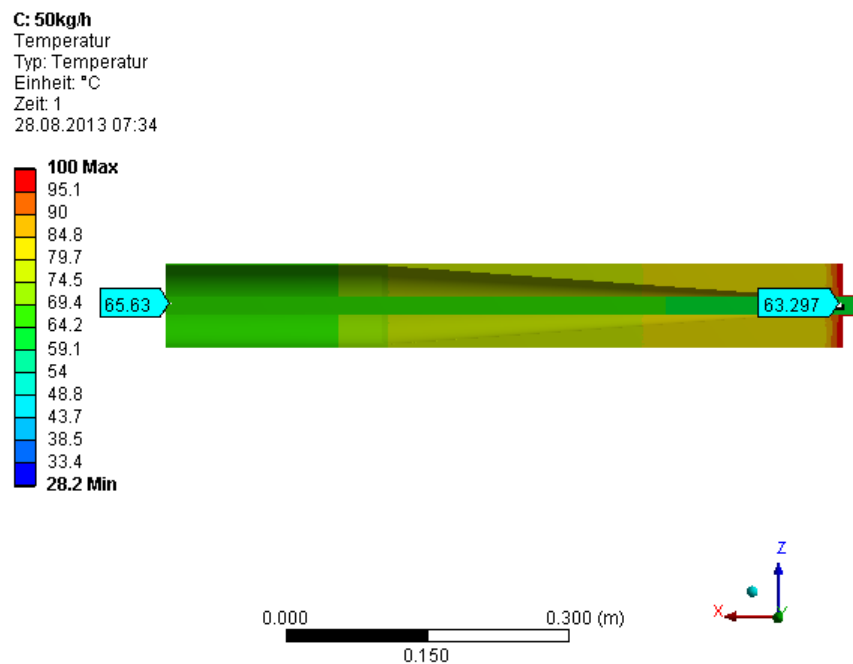


Abb. 28: Temperaturverteilung Auslass mit Isolierung

Mit Hilfe der Temperaturdifferenzen des Luftstroms zwischen Einlass und Beginn Rohr bzw. Ende Rohr und Auslass lässt sich der eingetragene Wärmestrom nach Gleichung (37) bestimmen. Hierbei ist  $\dot{m} = 50 \text{ kg/h}$  und  $c_p$  wird mit  $1,011.5 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$  bei einer mittleren Temperatur von  $45^\circ\text{C}$  angenommen.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (37)$$

In Tab. 3 sind die eingetragenen Wärmeströme gegenüber gestellt. Es wird ersichtlich, dass die zusätzlichen Wärmeströme durch eine Isolierung deutlich vermindert werden können. Im untersuchten Fall jeweils um ca. 35% im Ein- und Auslassbereich.

	Einlassbereich		Auslassbereich	
	$\Delta T$ [K]	$\dot{Q}$ [W]	$\Delta T$ [K]	$\dot{Q}$ [W]
Ohne Isolierung	5.5	77	3.7	52
Mit Isolierung	3.6	51	2.3	32

Tab. 3: Wärmestrom Vergleich ohne/mit Isolierung im Ein- bzw. Auslass

## 10.2 Einbau einer zusätzlichen Isolierung

Wie die FEM-Simulationen gezeigt haben, ist es sinnvoll eine Isolierung vor den Stirnflächen des Kon-/Diffusors zu platzieren. Damit die freie Oberflächenlänge des zu testenden Rohres im Becken nicht verkürzt wird, werden der Kon-/Diffusor weiter in das Ein- bzw. Auslassrohr geschoben.

Da sich der Konfusor nur  $15\text{mm}$  verschieben lässt, ist hier die maximale Dicke der Isolierung beschränkt. Bedingt durch die Geometrie wird die Isolierungsdicke am Einlass auf  $15\text{mm}$  festgelegt und für die Isolierungsdicke am Auslass wurden  $20\text{mm}$  gewählt. Durch die Vergrößerung des Abstandes zwischen Kon- und Diffusor muss auch das Testrohr länger sein ( $1,085\text{mm}$  anstatt  $1,050\text{mm}$ ).

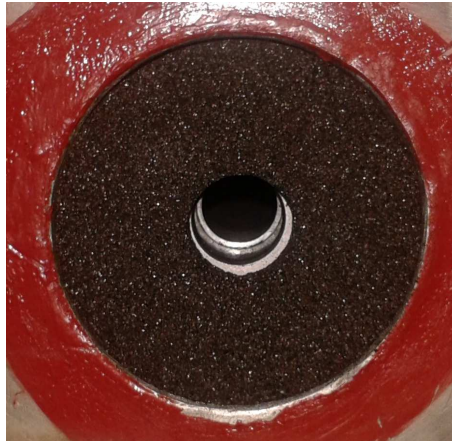
Als Isolierungsmaterial wurden zwei verschiedene Materialien getestet:

FOAMGLAS ( $\lambda = 0.042 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) [FOA13]

PVC ( $\lambda \approx 0.18 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ) [PVC13]

FOAMGLAS kann nur mit der Hand bearbeitet werden. Aufgrund der hohen Sprödigkeit kann es nicht zur mechanischen Bearbeitung eingespannt werden. Außerdem ist ein zerstörungsfreier Ausbau der Isolierung beim Austausch der Testrohre kaum möglich.

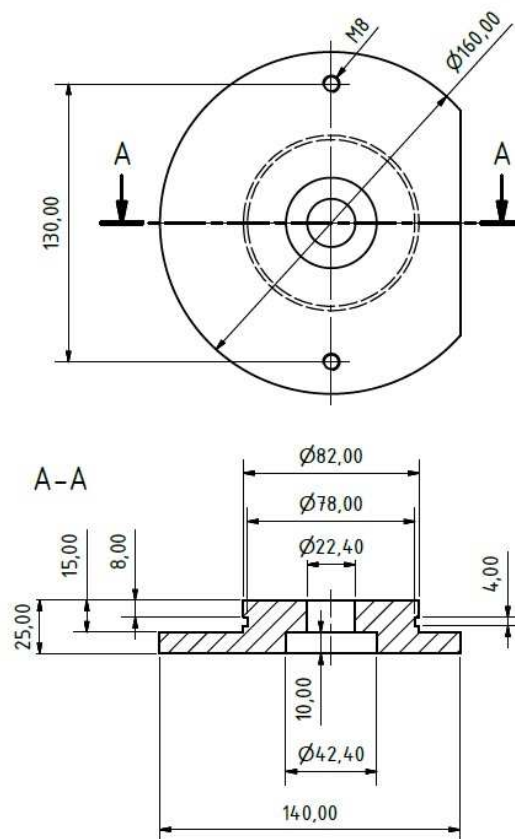
Abb. 29 zeigt eine eingebaute Isolierscheibe aus FOAMGLAS.



**Abb. 29: Isolierung aus FOAMGLAS**

Daher wurden für einen zweiten Versuch Isolierscheiben aus PVC gefertigt. PVC lässt sich deutlich besser bearbeiten, z.B. mit einer Drehmaschine.

Zur einfacheren Demontage haben die PVC-Scheiben einen größeren Außendurchmesser im Bereich des Beckens und sind folglich dicker. Damit die Wärmeübergangslänge des Rohres bei 1m bleibt, wurden die Scheiben innen ausgedreht (siehe Abb. 30, bzw. Fertigungszeichnungen für die PVC-Isolierscheiben im Anhang 17.2).



**Abb. 30: Zeichnung einer Isolierscheibe (nicht maßstabsgerecht)**

Die Demontage der Isolierung erfolgt durch Einschrauben von zwei Schrauben, welche die Isolierung aus dem Ein-/Auslassrohr drücken (Vgl. Abb. 31). Somit können die Testrohre einfach und ohne Zerstörung der Isolierung ausgetauscht werden.



**Abb. 31: Montierte Isolierringe mit Testrohr, Schrauben zur Demontage**

### 10.3 Messergebnisse

Für die Bewertung der Wirksamkeit der Isolierung und die Bestimmung des zusätzlichen Wärmeeintrages werden die Oberflächentemperaturen an den Temperaturmessstellen und an Kon-/Diffusor gemessen. Abb. 32 zeigt die Position der Oberflächenthermoelemente.

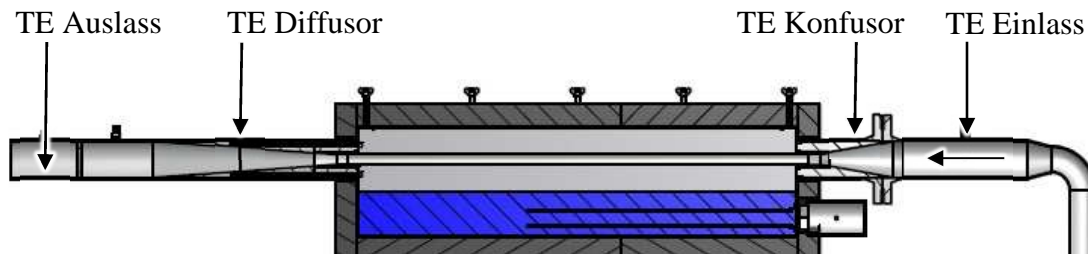


Abb. 32: Position Oberflächenthermoelemente

In Abb. 33 sind die Temperaturen am Flansch (TE Konfusor) des Eingangsrohres im Vergleich mit/ohne Isolierung dargestellt.

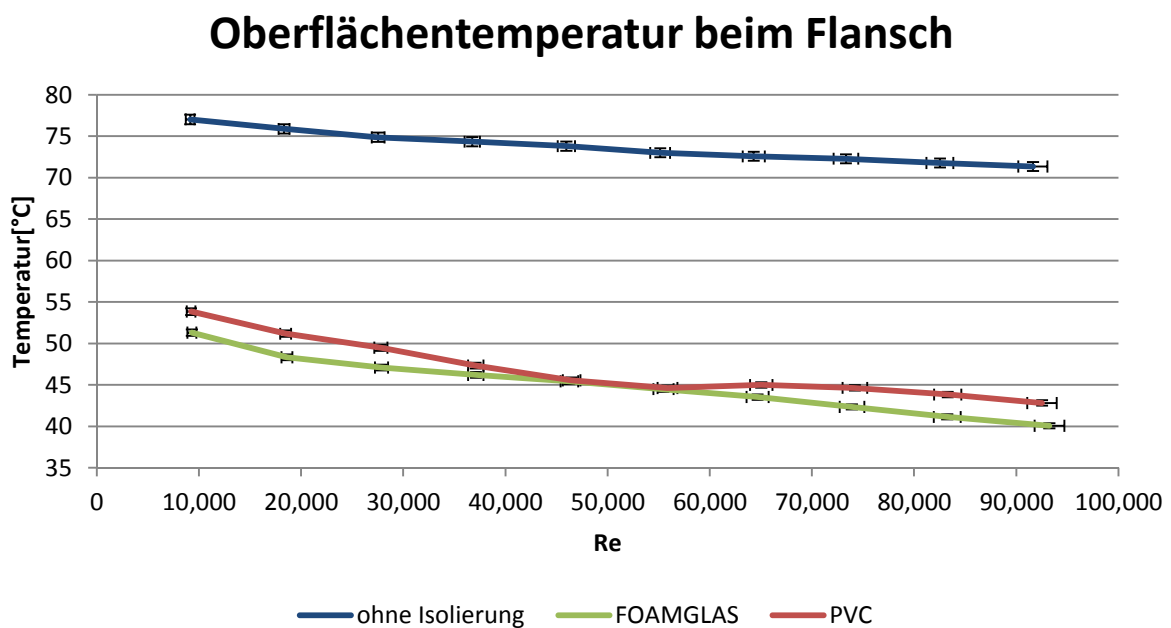
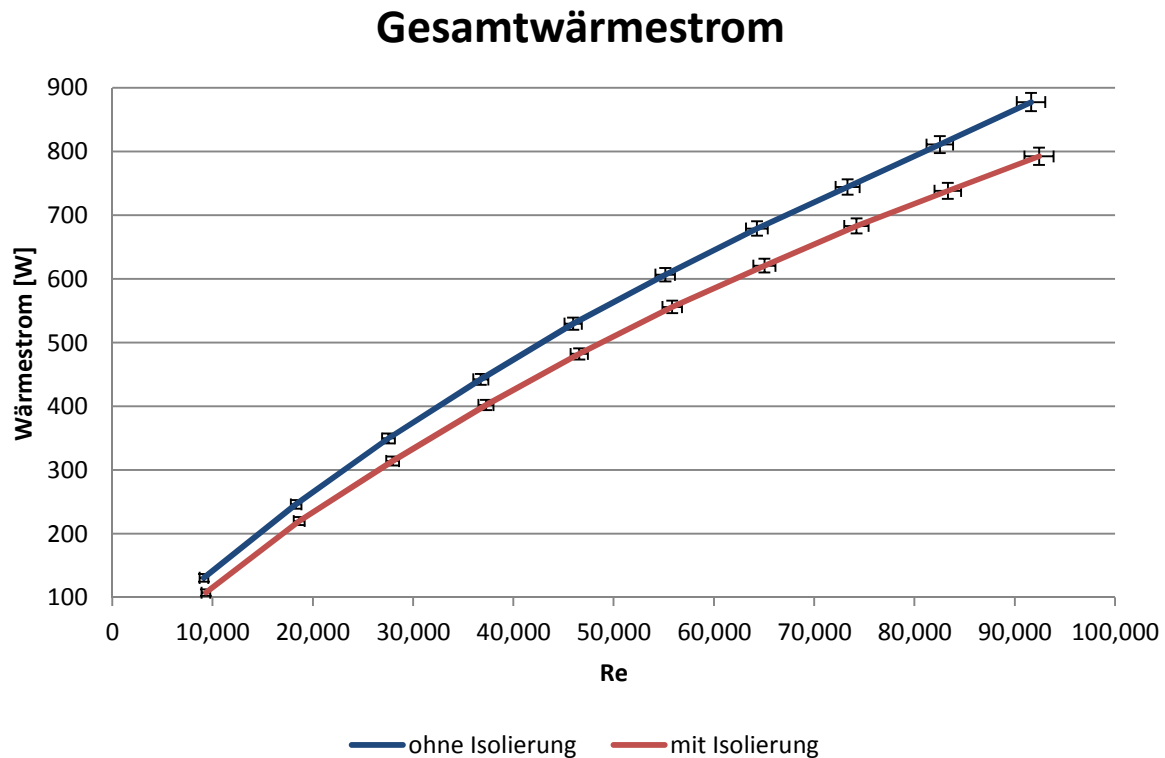


Abb. 33: Vergleich Temperatur am Flansch ohne und mit Isolierung

Es ist deutlich sichtbar, dass die Oberflächentemperatur bei den Messreihen mit Isolierung um mehr als 20K geringer ist, als bei den Messungen ohne Isolierung. Im Ausgangsbereich erfolgt eine Senkung der Wandtemperatur im Bereich des Diffusors um 10K. Zwischen FOAMGLAS und PVC ist kein großer Unterschied bei der Wandtemperatursenkung.

Abb. 34 zeigt, den Wärmeeintrag auf den Luftstrom mit und ohne Isolierung. Hier wird sichtbar, dass durch die Senkung der Wandtemperatur auch insgesamt weniger Wärme auf den Luftstrom eingetragen wird.

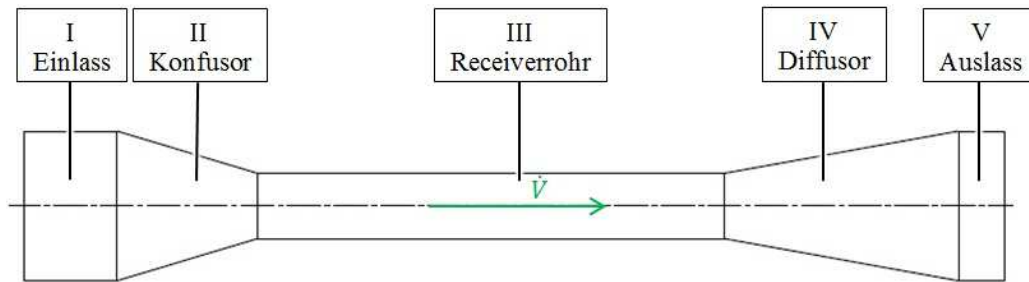


**Abb. 34: Vergleich Gesamtwärmestrom ohne und mit Isolierung**



## 11. Bestimmung des Wärmeeintrages im Glattrohr

Für die Berechnung des Wärmestromes wird die Durchströmungsstrecke wie bei der Druckverlustbestimmung (Kapitel 8) in Bereiche (Abb. 35) aufgeteilt. Der Gesamtwärmestrom in die Luft berechnet sich aus den Teilwärmeströmen der einzelnen Abschnitte.



**Abb. 35: Bereichsaufteilung Wärmestromberechnung**

Die Wandtemperatur, die mit den Oberflächenthermoelementen (siehe Abb. 32) gemessen wurde, geht in die theoretische Wärmestromberechnung (Formel (38) [Dub07 S. D29]) ein. Wegen der hohen Wärmeleitfähigkeit der metallischen Teile wird angenommen, dass die Wandtemperatur außen gleich der Wandtemperatur innen ( $\vartheta_W$ ) ist.

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (\vartheta_W - \vartheta_F) \quad (38)$$

Für den Konfuser und Diffusor wird für die Berechnungen der mittlere Durchmesser angenommen. Die Berechnung des Wärmeübergangskoeffizienten  $\alpha$  erfolgt mit Hilfe der Nußelt-Zahl. (Gleichung (39) [Dub07 S. D32])

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{d} \quad (39)$$

Für die Berechnung der Nußelt-Zahl werden verschiedene Korrelationen verwendet. Diese ist von der Reynoldszahl abhängig. In der Literatur gibt es unterschiedliche Korrelationen. Es werden nachfolgen drei verschiedene Ansätze der Berechnung vorgestellt und verglichen.

### 11.1 Berechnung nach VDI-Wärmeatlas mit Überschlagsformel

Gleichung (40) [VDI06, S.Ga7] ist eine Überschlagsformel, welche im laminaren, turbulenten und Übergangsbereich gültig ist. Der Gültigkeitsbereich ist auf Prandtl-Zahlen im Bereich von  $0.5 < Pr < 1.5$  beschränkt. Luft hat im untersuchten Bereich von  $20^\circ\text{C}$  bis  $100^\circ\text{C}$  eine Prandtl-Zahl um 0.7 [VDI06, S. Dbb2].

$$Nu = 0.0214 \cdot (Re^{0.8} - 100) \cdot Pr^{0.4} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{d}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (40)$$

## 11.2 Berechnung nach VDI-Wärmeatlas in Abhängigkeit vom Strömungszustand

Für laminare Rohrströmung ( $Re < 2,300$ ) bei konstanter Wandtemperatur wird Gleichung (41) [VDI06, S. Ga2] zur Berechnung der Nußelt-Zahl verwendet.

$$Nu_L = \left[ Nu_{m,\vartheta,1}^3 + 0.7^3 + (Nu_{m,\vartheta,2} - 0.7)^3 + Nu_{m,\vartheta,3}^3 \right]^{\frac{1}{3}} \quad (41)$$

Mit Formel (42), (43) und (44). [VDI06, S. Ga2]

$$Nu_{m,\vartheta,1} = 3.66 \quad (42)$$

$$Nu_{m,\vartheta,2} = 1.615 \cdot \left( Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (43)$$

$$Nu_{m,\vartheta,3} = \left( \frac{2}{1 + 22 \cdot Pr} \right)^{\frac{1}{6}} \cdot \left( Re \cdot Pr \cdot \frac{d}{l} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (44)$$

Die Nußelt-Zahl für turbulente Rohrströmung berechnet sich mit Gleichung (45) [VDI06, S. Ga5]. Der Gültigkeitsbereich ist:  $10^4 \leq Re \leq 10^6$ ;  $0.1 \leq Pr \leq 10^3$ ;  $\frac{d}{l} \leq 1$ .

$$Nu_T = \frac{\frac{\xi}{8} \cdot Re \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{\xi}{8}} \cdot \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{d}{l} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \quad (45)$$

Der Parameter wird  $\xi$  mit Formel (46) [VDI06, S. Ga5] berechnet.

$$\xi = (1.8 \cdot \log Re - 1.5)^{-2} \quad (46)$$

Im Übergangsbereich zwischen laminarer und turbulenter Strömung ( $2,300 < Re < 10^4$ ) wird zwischen Formel (41) und (45) interpoliert. Hierfür wird die Interpolationsgleichung (47) [VDI06, S. Ga6] verwendet. Hierbei wird bei der Nußelt-Zahl für den laminaren Bereich ( $Nu_{L,2300}$ )  $Re = 2,300$  gesetzt. Bei der Nußelt-Zahl für den turbulenten Bereich ( $Nu_{T,10^4}$ ) wird  $Re = 10^4$  gesetzt.

$$Nu = (1 - \gamma) \cdot Nu_{L,2300} + \gamma \cdot Nu_{T,10^4} \quad (47)$$

Mit Formel (48) [VDI06, S. Ga7].

$$\gamma = \frac{Re - 2,300}{10^4 - 2,300} \quad 0 \leq \gamma \leq 1 \quad (48)$$

### 11.3 Berechnung nach Fundamentals of Heat and Mass Transfer

Für die laminare Strömung ( $Re < 2,300$ ) wird Gleichung (49) [HMT06, S. 507] verwendet.

$$Nu_L = 3.66 \quad (49)$$

Die Nußelt-Zahl im turbulenten Gebiet berechnet sich nach Gleichung (50). Der Gültigkeitsbereich ist:  $3,000 \leq Re \leq 5 \cdot 10^6$ ;  $0.5 \leq Pr \leq 2,000$ . [HMT06, S. 515]

$$Nu_T = \frac{\frac{f}{8} \cdot (Re - 1,000) \cdot Pr}{1 + 12.7 \cdot \sqrt{\frac{f}{8}} \cdot \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (50)$$

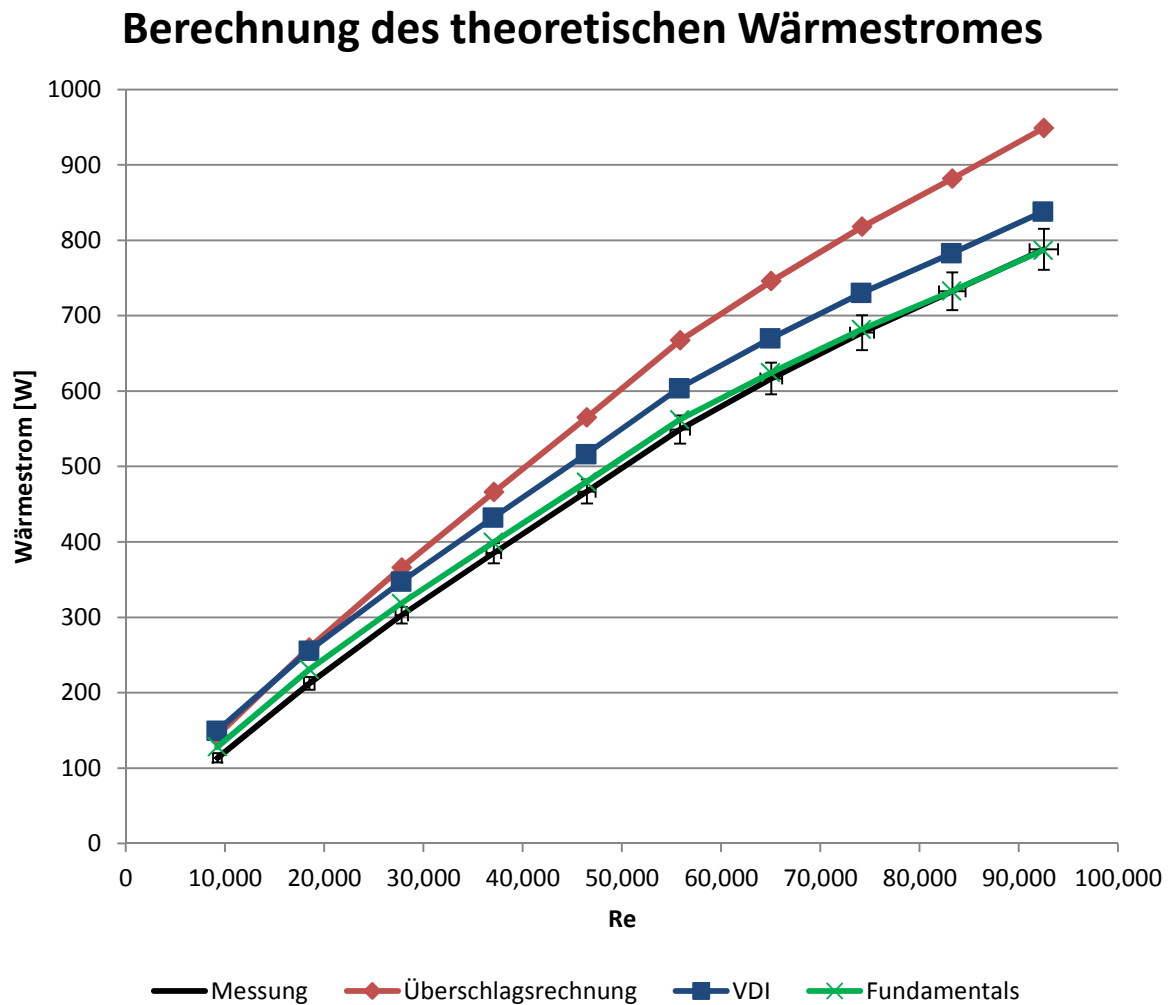
Die Berechnung des Parameters  $f$  erfolgt mit Formel (51). [HMT06, S. 490]

$$f = (0.79 \cdot \ln Re - 1.64)^{-2} \quad (51)$$

Im Übergangsbereich kann hier ebenfalls mit Formel (47) und (48) interpoliert werden.

## 11.4 Vergleich Theorie mit Glattrohr

Abb. 36 zeigt die Verläufe der theoretischen Gesamtwärmeströme in Abhängigkeit von der Reynoldszahl, die mit Hilfe der oben beschriebenen Formeln ermittelt wurden. Des Weiteren ist zum Vergleich der aus der gemessenen Temperaturdifferenz zwischen Ein- und Auslass bestimmte Wärmestrom in das Diagramm eingetragen. Ebenfalls ist zum Vergleich der theoretische Wärmestrom des Receiverrohrs eingetragen.

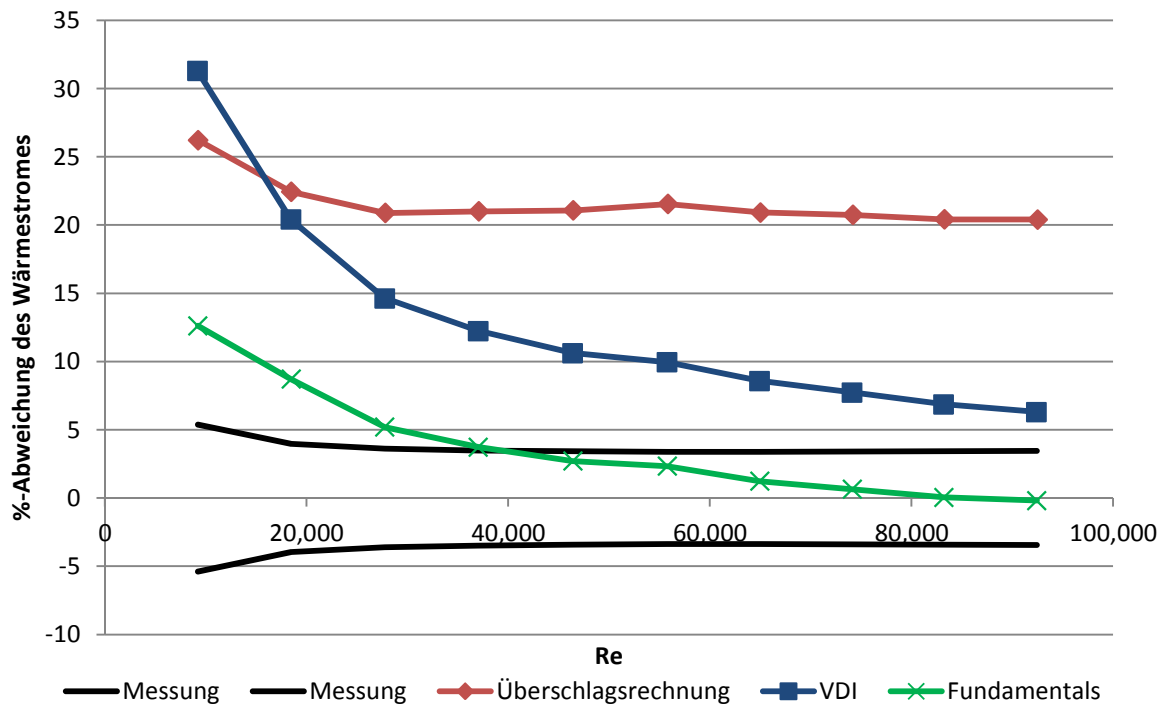


**Abb. 36: Vergleich Berechnungsverfahren theoretische Gesamtwärmestrom**

Die FEM-Berechnungen liefern ähnliche Ergebnisse, wie die theoretische Handrechnung, da die theoretisch berechneten Wärmeübergangskoeffizienten in den FEM-Berechnungen verwendet wurden.

Die prozentuale Abweichung der theoretisch berechneten Wärmeströme ist in Abb. 37 zu sehen. Weiterhin ist zum Vergleich die Ungenauigkeit der Wärmestrombestimmung aus den Messungen eingetragen. Die allgemeine Bestimmung des Fehlers erfolgt in Kapitel 8.3.

### **Prozentuale Abweichung Wärmestromberechnung (Basis Messung)**



**Abb. 37: Abweichung der theoretischen Wärmestrom-Berechnungsverfahren von Messung**

Zu erkennen ist, dass die Rechnung nach „Fundamentals of Heat and Mass Transfer“, die geringste Abweichung vom gemessenen Wärmestrom hat.

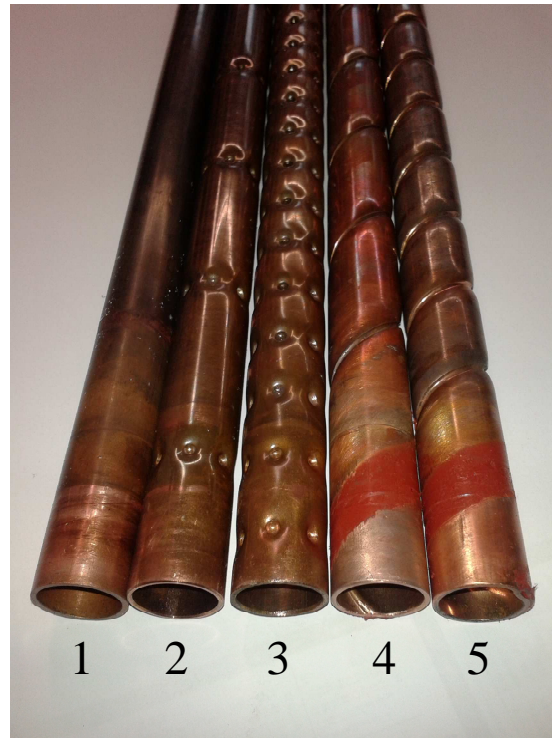
Die deutlichen Unterschiede bei den theoretisch berechneten Gesamtwärmeströmen ergeben sich im Wesentlichen aus den Ergebnissen der Berechnung im Bereich des eigentlichen Testrohrs (Abb. 35, Bereich III) mit den unterschiedlichen Korrelationen.

Auffällig ist, dass die Abweichungen zwischen theoretischer Berechnung und Experiment im Bereich geringer Reynoldszahlen bei allen Korrelationen zunimmt. Vermutlich handelt es sich hier um strömungsmechanische Bedingungen (Übergangsbereich, hydrodynamische bzw. thermische Einlaufstrecke), welche mit den Korrelationen nicht abgebildet werden können.

Im Folgenden werden die Korrelationen aus „Fundamentals of Heat and Mass Transfer“ verwendet, um die zusätzlichen Wärmeströme in Ein- und Ausgangsbereich abzuschätzen. Mit Formel (38) kann dann der der Wärmeübergangskoeffizient  $\alpha$  des eingebauten Receiverrohrs bestimmt werden.

## 12. Vergleich verschiedener strukturierter Rohre

In den Teststand wurden die in Abb. 38 dargestellten Testrohre eingebaut.



**Abb. 38: Vermessene Testrohre**

Die Spezifikationen der einzelnen Rohre sind in Tab. 4 zusammengefasst. Alle Rohre haben eine Länge von  $1,085\text{mm}$ , einen Außendurchmesser von  $22.4\text{mm}$  und eine Wandstärke von  $1.4\text{mm}$ . Die Rohre sind aus Kupfer.

1	Glattrohr		
2	Gedelltes Rohr	6 Dellen alle $60\text{mm}$	Tiefe = $3\text{mm}$
3	Gedelltes Rohr	6 Dellen alle $20\text{mm}$	Tiefe = $3\text{mm}$
4	Drallrohr	Steigung = $48\text{mm}$	Tiefe = $1.5\text{mm}$
5	Drallrohr	Steigung = $32\text{mm}$	Tiefe = $1.9\text{mm}$

**Tab. 4: Übersicht gemessene Testrohre**

Die nachfolgenden Temperaturdifferenzen, Wärmeströme und Druckverluste beziehen sich nur auf das Testrohr. Zusätzliche Einflüsse wurden rechnerisch korrigiert, wie in Kapitel 9 und 11 diskutiert. Das Zeitkriterium wurde auf  $20\text{min}$  festgelegt und das Abweichungskriterium war  $\pm 0.1\text{K}$  bei den automatischen Messungen.

Abb. 39 zeigt den Druckverlust bei verschiedenen Reynoldszahlen von verschiedenen Rohren. Aufgrund einer Überdruckbegrenzung am Kompressor konnten nicht alle Reynoldszahlen bei allen Rohren angefahren werden. Es ist zu erkennen, dass alle strukturierten Rohre bei gleicher Reynoldszahl einen höheren Druckverlust als das Glattrohr haben. Das strukturierte Rohr 3 (Dellen alle 20mm) hat den höchsten Druckverlust.

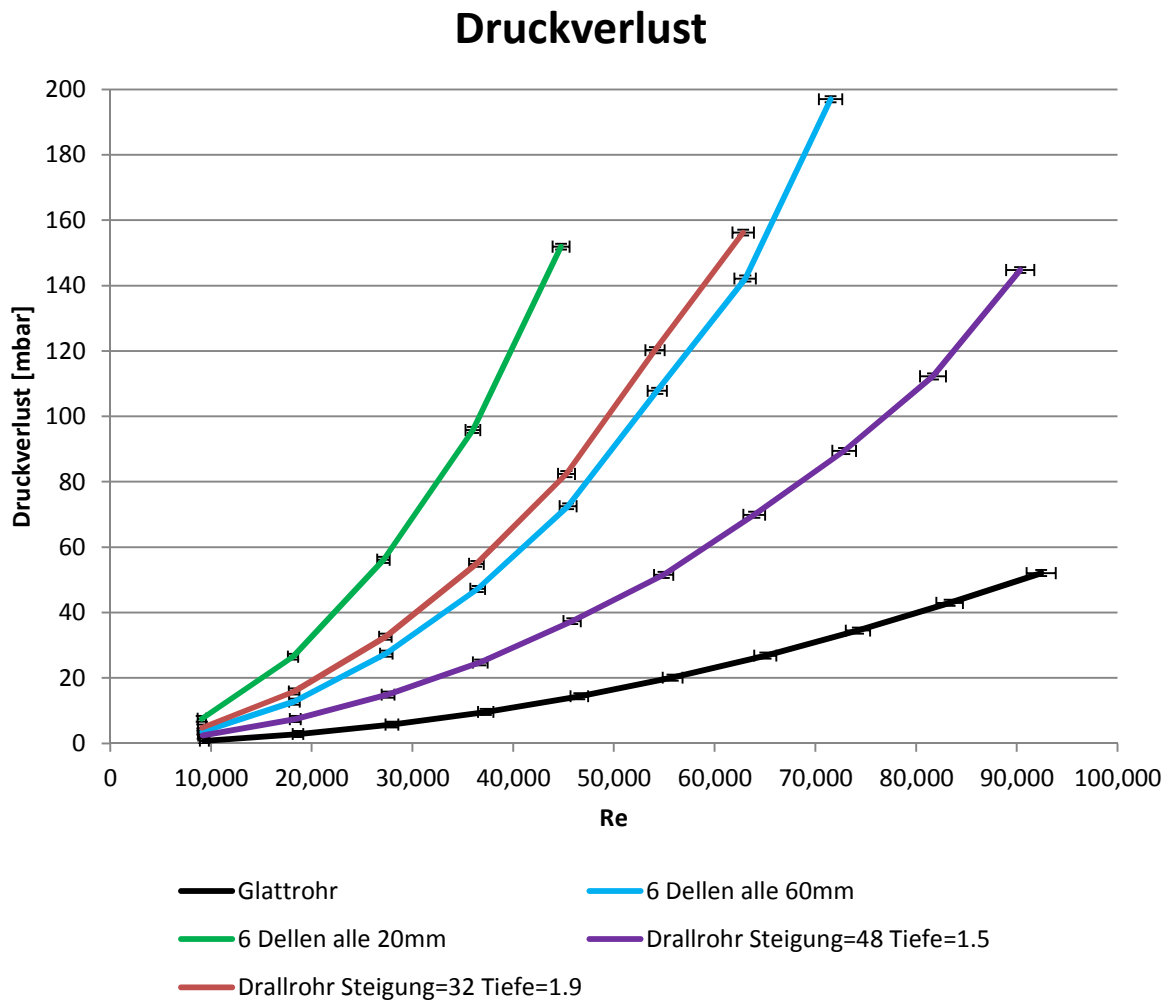
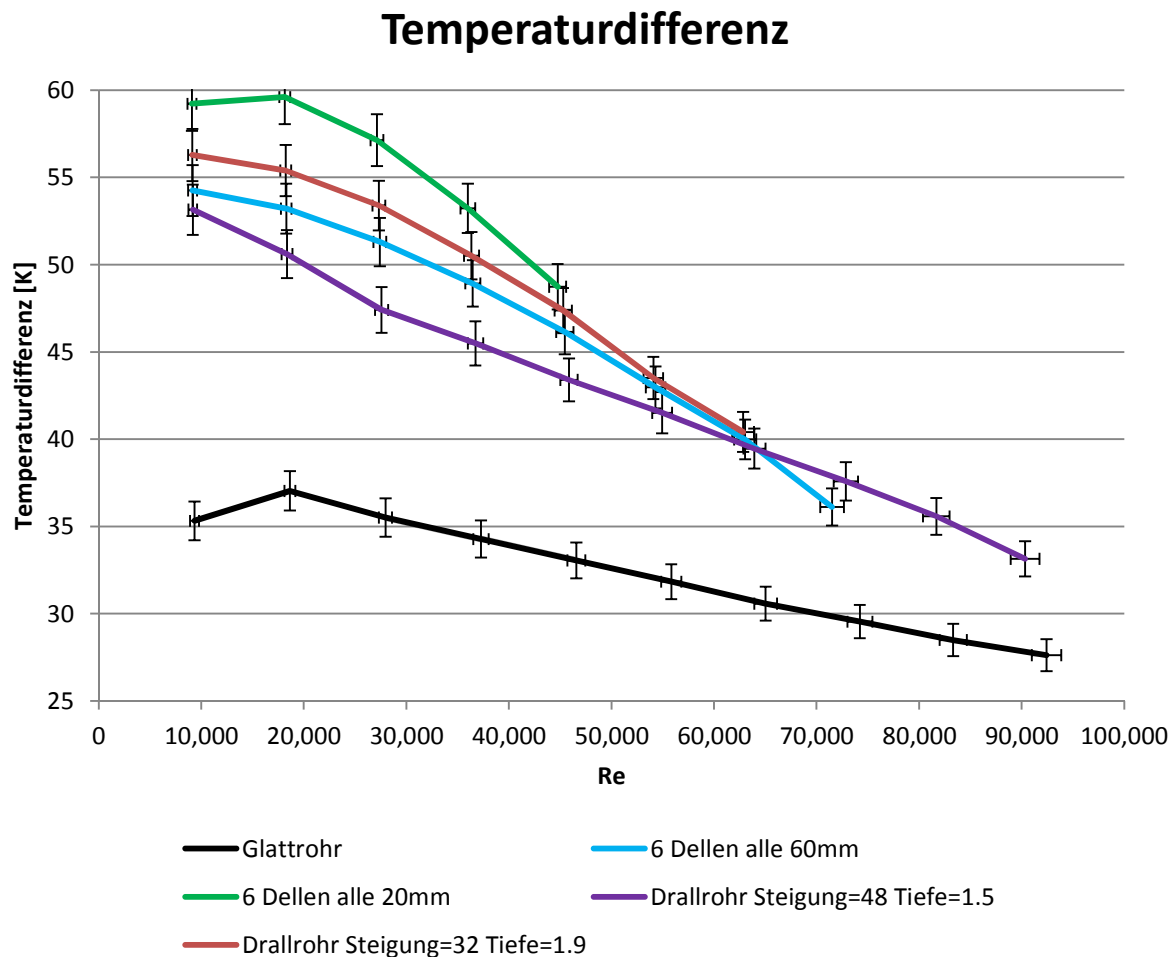


Abb. 39: Vergleich Druckverlust zwischen strukturierten Rohren

In Abb. 40 ist der Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen Rohrein- und Rohrauslass dargestellt. Zu erkennen ist, dass mit zunehmender Reynoldszahl die Differenz abnimmt. Das Rohr 3 (Dellen alle 20mm) hat bei geringen Reynoldszahlen die größte Temperaturdifferenz. Mit steigender Reynoldszahl nimmt die Temperaturdifferenz bei den strukturierten Rohren im Vergleich zum Glattrohr relativ schnell ab.



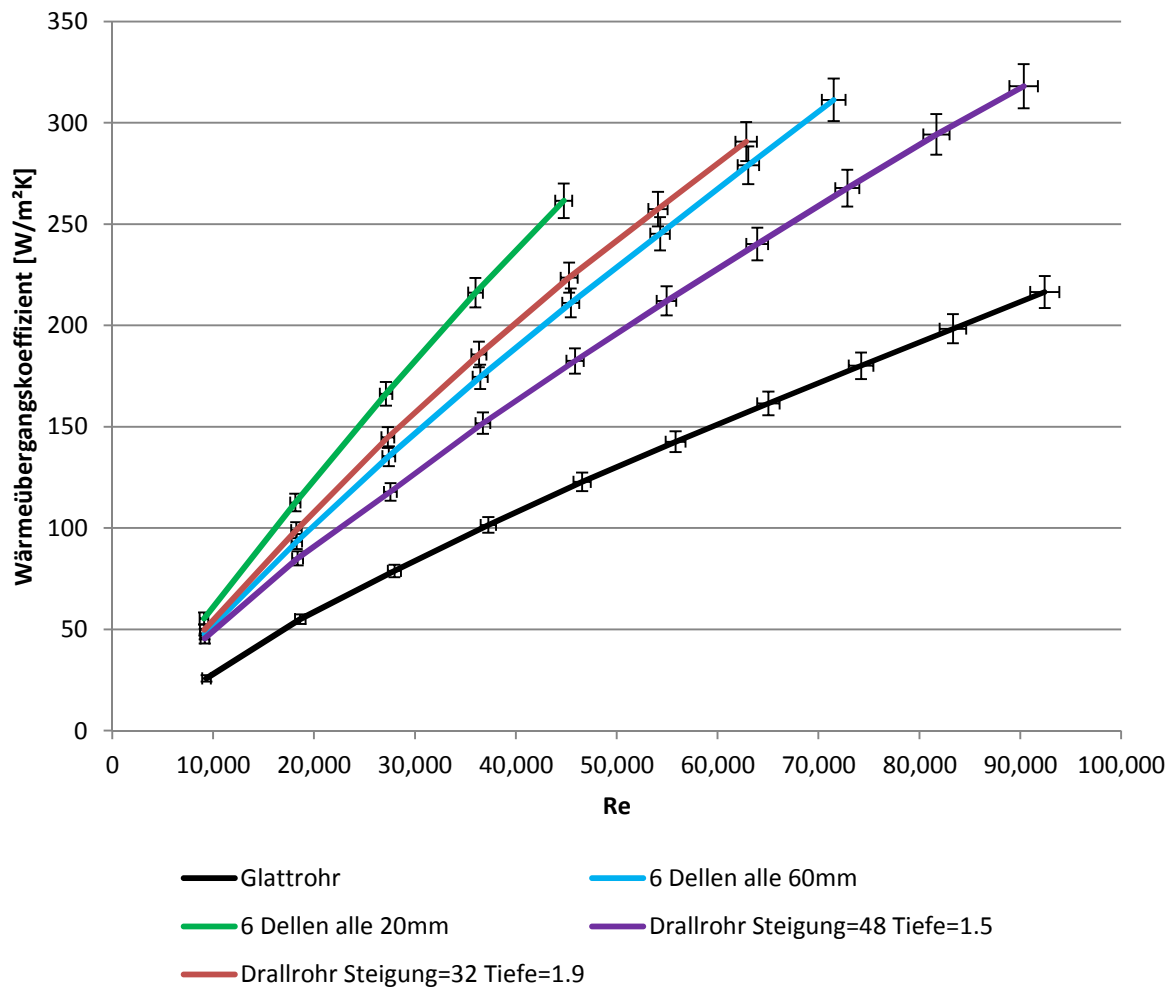
**Abb. 40: Vergleich Temperaturdifferenz zwischen strukturierten Rohren**



**Abb. 41: Vergleich Wärmestrom zwischen strukturierten Rohren**

In Abb. 42 ist der Wärmeübergangskoeffizient der aus dem Wärmestrom ermittelt wurde über der Reynoldszahl dargestellt. Ersichtlich wird, dass mit steigender Reynoldszahl der Wärmeübergangskoeffizient auch steigt und dass der Wärmeübergangskoeffizient bei strukturierten Rohren erheblich größer ist als am Glattrohr. Des Weiteren wird hier ersichtlich, dass das Rohr 3 (Dellen alle 20mm) den im Vergleich den größten Wärmeübergangskoeffizient bezüglich einer Reynoldszahl hat.

## Wärmeübergangskoeffizient

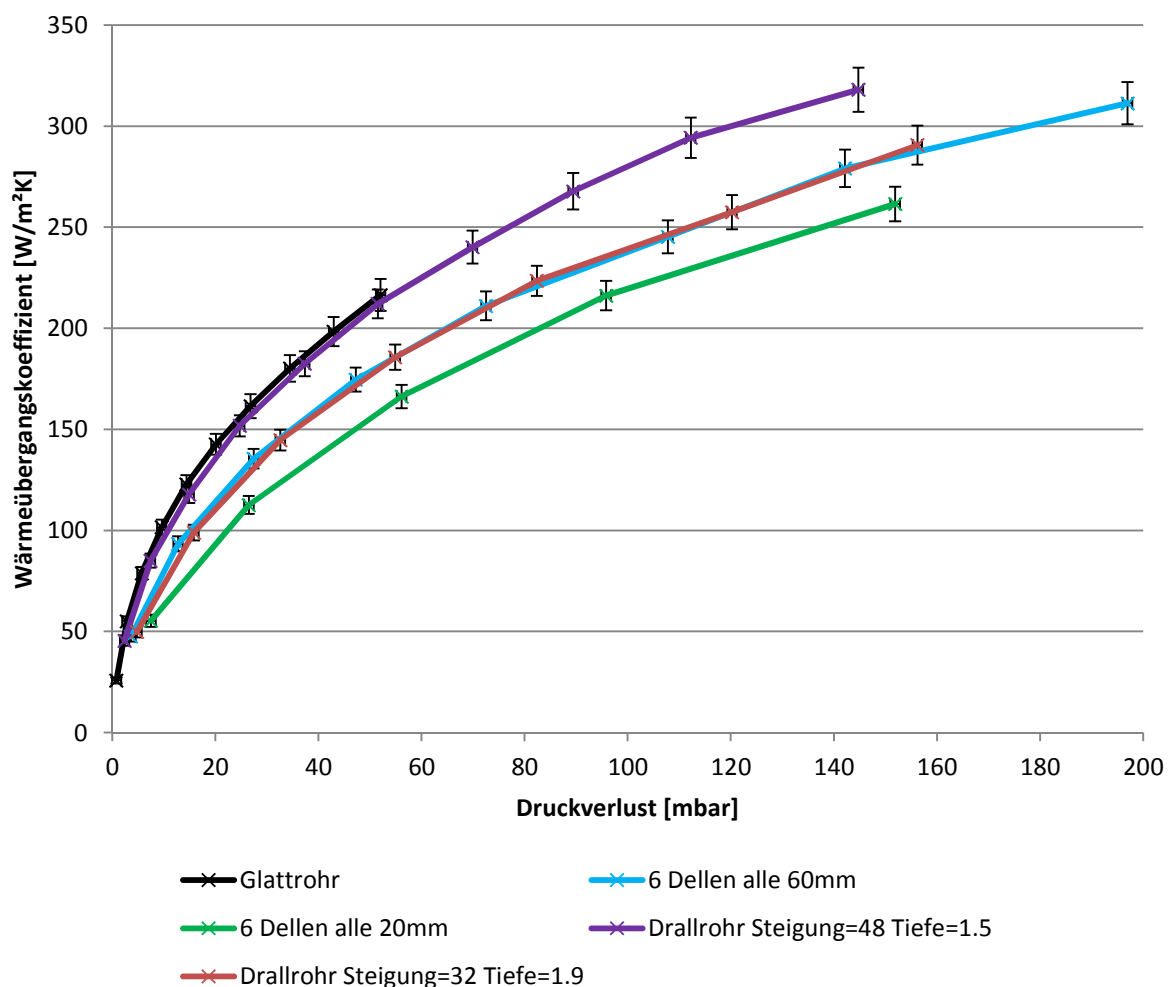


**Abb. 42: Vergleich Wärmeübergangskoeffizient zwischen strukturierten Rohren**

Anhand von Abb. 39 bis Abb. 42 wird ersichtlich, dass der Wärmeübergang in Rohren durch größere Reynoldszahlen, als Strömungsgeschwindigkeiten gesteigert werden kann, oder dass durch eine entsprechende Strukturierung des Rohres der Wärmeübergang gesteigert werden kann. Allerdings steigt bei beiden Maßnahmen der Druckverlust.

Abb. 43 zeigt den Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit vom Druckverlust bei verschiedenen strukturierten Rohren. Zu erkennen ist, dass das Glattrohr und Drallrohr 4 (Steigung 48mm) ungefähr die gleiche Abhängigkeit zwischen Druckverlust und Wärmeübergangskoeffizient haben. Drallrohr 4 hat bereits bei geringeren Reynoldszahlen einen höheren Wärmeübergang. Eine ähnliche Abhängigkeit besteht bei Rohr 2 (Dellen alle 60mm) und dem Drallrohr 5 (Steigung 32mm).

### Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit vom Druckverlust



**Abb. 43: Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit vom Druckverlust bei strukturierten Rohren**

Je nach Auslegungskriterien können strukturierte Rohre vorteilhaft für die Dimensionierung einen Rohrreceiver oder allgemein für einen Wärmeüberträger sein. Bei gleichbleibenden Strömungsbedingungen könnte so die Baugröße reduziert werden, ohne die Wärmeübertragung zu vermindern.

### **13. Zusammenfassung und Ausblick**

Im Rahmen dieser Bachelorarbeit wurde ein bereits vorhandener thermohydraulischer Teststand des DLR-Instituts für Solarforschung qualifiziert, optimiert und automatisiert.

Mit Hilfe der Automatisierung ist es jetzt möglich, mehrere Massenströme nacheinander automatisch anzufahren. Durch eine Benutzeroberfläche ist die Konfiguration von Messserien erleichtert worden. Aus Sicherheitsgründen wurde dafür gesorgt, dass sich der Teststand automatisch abschaltet, wenn nicht mehr genügend Wasser im Becken ist, damit die Heizspirale ausreichend mit Wasser bedeckt ist.

Zwei Nachfüllvorrichtungen wurden ergänzt, welche das Nachfüllen von Wasser bei geschlossenem Becken und während des Betriebes ermöglichen. Weiterhin ist eine Kondensationseinrichtung geplant, welche den überschüssigen Wasserdampf rückkondensiert und direkt in das Becken zurücklaufen lässt.

Durch die Überarbeitung des Teststandes wird der Bediener deutlich entlastet.

Qualifiziert und Optimiert wurde der Teststand bezüglich des zusätzlichen Wärmeeintrages im Ein- und Auslassbereich. Mittels FEM wurde die Möglichkeit untersucht, diesen mit einer zusätzlichen Isolierung im Becken zu reduzieren. Der zusätzliche Wärmeeintrag konnte durch den Einbau von zwei PVC-Isolierscheiben gesenkt werden.

Mit Hilfe von analytischen Korrelationen wurde der zusätzliche Wärmeeintrag in die Luft theoretisch bestimmt.

Auch der zusätzliche Druckverlust im Ein- und Auslassbereich wurde rechnerisch ermittelt.

Durch die Korrektur des Druckverlustes konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie erreicht werden.

Bei der theoretischen Berechnung des Gesamtwärmestromes lieferten unterschiedliche Korrelationen verschiedene Ergebnisse. Die beste Übereinstimmung liefert eine Korrelation aus „Fundamentals of Heat and Mass Transfer“.

Abschließend sind im Rahmen dieser Arbeit mehrere verschiedene strukturierte Rohre vermessen und verglichen worden.

Die Durchführung von weiteren Messungen an verschiedenen strukturierten Rohren und die Veröffentlichung der Ergebnisse sind geplant.

## 14. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Solarthermisches Turmkraftwerk .....	7
Abb. 2: Aufbau des Teststandes .....	8
Abb. 3: Teststand mit Receiverrohr im eingebautem Zustand .....	9
Abb. 4: Wassernachfüllung in geschlossenes Becken mit größerem Durchfluss .....	10
Abb. 5: Nachfüllvorrichtung unterhalb des Wasserspiegels .....	11
Abb. 6: Kondensationswendel .....	13
Abb. 7: Schema Anwendung RGP-Funktion in Excel .....	14
Abb. 8: ungedämpfte Dauerschwingung .....	16
Abb. 9: PID Massenstromeinstellung .....	16
Abb. 10: Automatisierungshardware .....	18
Abb. 11: Signallaufplan automatisierter Teststand .....	19
Abb. 12: Bedienoberfläche des LabVIEW-Programms .....	20
Abb. 13: Rahmenstruktur Programm .....	22
Abb. 14: Ablauf Messwertspeicherung .....	24
Abb. 15: Ablauf Messaufnahmesteuerung .....	27
Abb. 16: Hysterese Temperaturdifferenz .....	29
Abb. 17: Absolute Abweichung der Temperaturdifferenzmessung .....	30
Abb. 18: Abschnittseinteilung für Druckverlustrechnung .....	35
Abb. 19: Vergleich Gesamtdruckverlust Messung mit Theorie .....	36
Abb. 20: Position Thermoelemente .....	37
Abb. 21: FEM-Randbedingungen an Geometrie .....	38
Abb. 22: FE-Netz Einlassbereich .....	39
Abb. 23: Temperaturverteilung Konfusor .....	40
Abb. 24: Position der Isolierung .....	40
Abb. 25: Temperaturverteilung Einlass ohne Isolierung .....	41
Abb. 26: Temperaturverteilung Einlass mit Isolierung .....	41
Abb. 27: Temperaturverteilung Auslass ohne Isolierung .....	42
Abb. 28: Temperaturverteilung Auslass mit Isolierung .....	42
Abb. 29: Isolierung aus FOAMGLAS .....	44
Abb. 30: Zeichnung einer Isolierscheibe (nicht maßstabsgerecht) .....	44
Abb. 31: Montierte Isolierscheibe mit Testrohr, Schrauben zur Demontage .....	45

Abb. 32: Position Oberflächenthermoelemente .....	46
Abb. 33: Vergleich Temperatur am Flansch ohne und mit Isolierung.....	46
Abb. 34: Vergleich Gesamtwärmestrom ohne und mit Isolierung.....	47
Abb. 35: Bereichsaufteilung Wärmestromberechnung .....	48
Abb. 36: Vergleich Berechnungsverfahren theoretische Gesamtwärmestrom .....	51
Abb. 37: Abweichung der theoretischen Wärmestrom-Berechnungsverfahren von Messung	52
Abb. 38: Vermessene Testrohre .....	53
Abb. 39: Vergleich Druckverlust zwischen strukturierten Rohren .....	54
Abb. 40: Vergleich Temperaturdifferenz zwischen strukturierten Rohren.....	55
Abb. 41: Vergleich Wärmestrom zwischen strukturierten Rohren .....	56
Abb. 42: Vergleich Wärmeübergangskoeffizient zwischen strukturierten Rohren .....	57
Abb. 43: Wärmeübergangskoeffizient in Abhängigkeit vom Druckverlust bei strukturierten Rohren .....	58

## 15. Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Randbedingungen FEM-Berechnung ursprünglicher Teststand.....	38
Tab. 2: Lastfälle FEM-Berechnung.....	39
Tab. 3: Wärmestrom Vergleich ohne/mit Isolierung im Ein- bzw. Auslass .....	43
Tab. 4: Übersicht gemessene Testrohre .....	53

## 16. Literatur

- [Ans14] ANSYS Germany GmbH: Ansys Workbench 14.5.7  
Unter: [http://www.ansys.com/de\\_de](http://www.ansys.com/de_de), Zugriff am 2013-05-27
- [CHD13] crydom: HD4840  
Unter: <http://docs-europe.electrocomponents.com/webdocs/04bd/0900766b804bd9f3.pdf>, Zugriff am 2013-08-21
- [DeH13] Delphin Technology AG, Hardware LogMessage 500  
Unter: <http://www.delphin.de/hardware/logmessage.html>,  
Zugriff am 2013-05-21
- [DEK13] DESERTEC Foundation: Das DESERTEC-Konzept  
Unter: <https://dl.dropboxusercontent.com/u/2639069/Konzept%20DESERTEC.pdf>, Zugriff am 2013-08-21
- [Del13] Delphin Technology AG  
Unter: <http://www.delphin.de/>  
Zugriff am 2013-05-21
- [DeS13] Delphin Technology AG, Software ProfiSignal Go  
Unter: <http://www.delphin.de/software/profisignal-go.html>,  
Zugriff am 2013-05-21
- [DES13a] Winterfeld, Sabine: DESERTEC: Solarstrom aus der Wüste  
Unter: [http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10200/448\\_read-255#gallery/89](http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10200/448_read-255#gallery/89), Zugriff am 2013-08-20
- [DES13b] Steur, Markus: Desertec  
Unter: <http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10614/#gallery/89>,  
Zugriff am 2013-08-20
- [Dru13] Wagner Mess- und Regeltechnik: Drucksensorik. Produktübersicht  
Unter: [http://www.wagner-msr.de/pagecontrols/downloads/downloads/public/7abf2670-592d-474d-abfe-d34963608c48/Drucksensorik\\_2012.pdf](http://www.wagner-msr.de/pagecontrols/downloads/downloads/public/7abf2670-592d-474d-abfe-d34963608c48/Drucksensorik_2012.pdf),  
Zugriff am 2013-08-21



- [Dub07] K.-H. Grote und J. Feldhusen (Hrsg.): Dubbel. Taschenbuch für den Maschinenbau. 22. Auflage Berlin Heidelberg New York: Springer, 2007.  
- ISBN 978-3-540-49714-1
- [ExH10] Excel 2010 Hilfe: RGP (Funktion)
- [Fit13] Institut für Solarforschung: schriftliche Mitteilung. Gefittete Korrelationen Stoffdaten Luft. DLR Stuttgart, 2013-06-06
- [FOA13] Deutsche FOAMGLAS GmbH: FOAMGLAS T4+  
Unter: [http://www.foamglas.de/\\_/frontend/handler/document.php?id=2198&type=42](http://www.foamglas.de/_/frontend/handler/document.php?id=2198&type=42), Zugriff am 2013-07-11
- [Geo13] Georgi, Boris; Fricke, Walter; Fleckenstein, Jens: Rechnen mit Excel. Regressionsrechnung  
Unter: <http://www.computerwoche.de/a/rechnen-mit-excel,2363205,13>, Zugriff am 2013-07-22
- [Her12] Herwig, Heinz; Wenterodt, Tammo: Entropie für Ingenieure. 1. Auflage Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2012. – ISBN 978-3-8348-1714-3
- [HMT06] Incropera, Frank P.; DeWitt, David P.; Bergman, Theodore L.; Lavine, Adrienne S.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6. Auflage USA: Wiley, 2006.  
- ISBN 978-0-471-45728-2
- [KaS13] Balluff: Kapazitiver Sensor  
Unter: [http://www.balluff.com/balluff/MDE/de/produkte/catalogue/products\\_details.jsp?id=BCS008M-367366](http://www.balluff.com/balluff/MDE/de/produkte/catalogue/products_details.jsp?id=BCS008M-367366), Zugriff am 2013-08-21
- [Lab10] National Instruments Germany GmbH: LabView 2010  
Unter: <http://www.ni.com/labview/d/>, Zugriff am 2013-05-16
- [MPG13] MPG Mendener Präzisionsrohr GmbH: MPG Rippenrohr-Pakete  
Unter: [http://www.mpg-tubes.com/userfiles/file/Infobroschueren/mpg\\_rippenrohr\\_pakete5.pdf](http://www.mpg-tubes.com/userfiles/file/Infobroschueren/mpg_rippenrohr_pakete5.pdf), Zugriff am 2013-07-25
- [PVC13] Goodfellow GmbH: PVC. Materialinformationen  
Unter: <http://www.goodfellow.com/G/Polyvinylchlorid-unplastifiziert.html>, Zugriff am 2013-07-15
- [RhJ13] Rheinländer, Jens: Vorbereitende Untersuchungen an einem thermohydraulischem Teststand. T3000 Bericht. DHBW Stuttgart, 2013-06-10

- [RoR13] Uhlig, Ralf; Amsbeck, Lars; Buck, Reiner: Rohrreceiver – Auslegungstools und Anwendung auf Luftreceiver  
Unter: [http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/Soko/Soko2007/Poster/12\\_Uhlig\\_Buck\\_Luftreceiver.pdf](http://www.dlr.de/sf/Portaldata/73/Resources/dokumente/Soko/Soko2007/Poster/12_Uhlig_Buck_Luftreceiver.pdf), Zugriff am 2013-08-20
- [Sig12] Sigloch, Herbert: Technische Fluidmechanik. 8. Auflage Berlin Heidelberg: Springer, 2012. – ISBN 978-3-642-22844-5
- [SOL12] Institut für Solarforschung: Absorberrohre für solare Hochtemperaturanwendung (SOLTUBE). Abschlussbericht. DLR Stuttgart, 2012-05-31
- [Spe13] Spectra GmbH & Co.KG:Dezentrale Feldbus E/A-Module & Systeme  
Unter: [http://www.spectra.de/files/Broschuere-Dezentrale-EA-Systeme\\_v12-1.pdf](http://www.spectra.de/files/Broschuere-Dezentrale-EA-Systeme_v12-1.pdf),  
Zugriff am 2013-05-16
- [TFA07] Trieb, Franz: Concentrating Solar Power for Seawater Desalination (AQUA-CSP). DLR, 2007 – Forschungsbericht
- [TFM05] Trieb, Franz: Concentrating Solar Power for the Mediterranean Region (MED-CSP). DLR, 2005 – Forschungsbericht
- [TFP13] Trieb, Franz: DESERTEC: Solar Power from the Desert. DLR Stuttgart, 2009  
Unter: <http://www.dlr.de/dlr/Portaldata/1/Resources/documents/Presentation-Desertec.pdf>, Zugriff am 2013-08-21
- [TFT06] Trieb, Franz: Trans-Mediterranean Interconnection for Concentrating Solar Power (TANS-CSP). DLR, 2006 – Forschungsbericht
- [TMe08] Fischer, Ulrich; Gomeringer, Roland; Heinzler, Max; Kilgus, Roland; Näher, Friedrich; Oesterle, Stefan; Paetzold, Heinz; Stephan, Andreas: Tabellenbuch Metall. 44. Auflage Haan-Gruiten: Europa-Lehrmittel, 2008. – ISBN 978-3-8085-1724-6
- [VDI06] VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (Hrsg.): VDI-Wärmeatlas. 10. Auflage Berlin Heidelberg: Springer, 2006.  
– ISBN 978-3-540-25504-8

## 17. Anhang

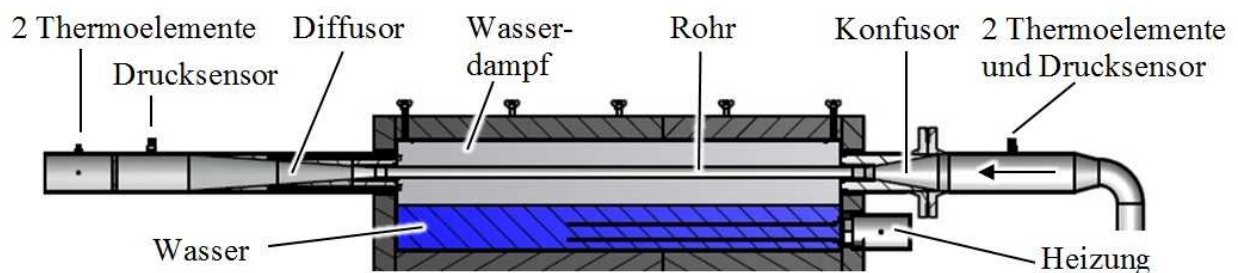
### 17.1 Bedienungsanleitung automatisierter Teststand

Nachfolgend ist eine kurze Bedienungsanleitung des automatisierten Teststandes aufgeführt.

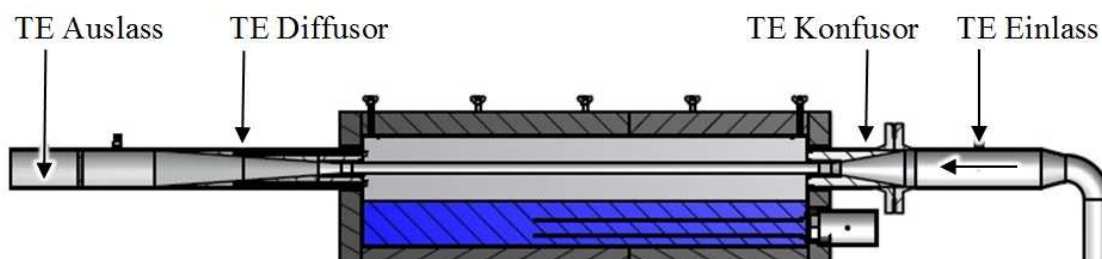
#### Teststand:



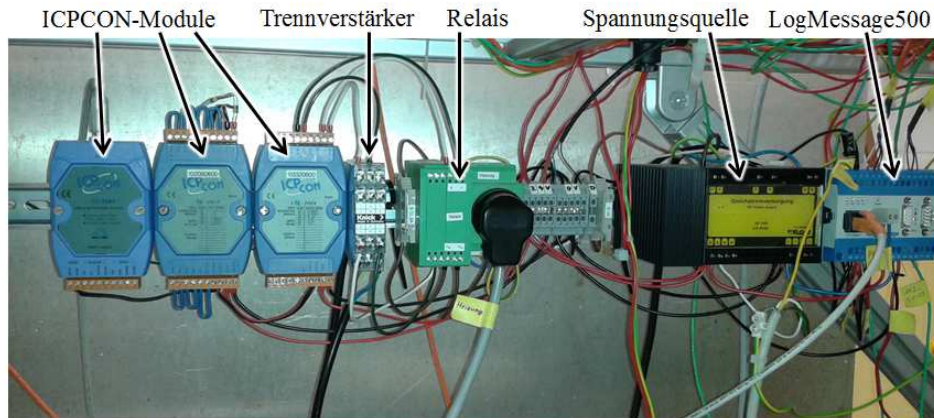
#### Schnitt durch Becken:



#### Position Oberflächenthermoelemente:



## Mess- und Steuerelektronik:



## Rohrmontage:

1. Konfusor 15mm tief in das Einlassrohr schieben
2. Montage der langen Schrauben in den Diffusor
3. Diffusor so weit in das Auslassrohr schieben, dass das Testrohr zwischen Diffusor und Konfusor ins Becken eingebaut werden kann
4. PVC-Isolierscheiben auf das Testrohr schieben (kleiner Außendurchmesser der Isolierung zeigt in Richtung des nächsten Rohrendes)
5. Rohrenden auf einer Länge von 25mm etwas einfetten
6. Rohrende mit der dickeren Isolierung zuerst in Richtung Diffusor (Auslass) schräg ins Becken einführen und dann das Rohrende in die Konfusorbuchse komplett einschieben
7. Diffusor an den Schrauben in Richtung Becken ziehen und bis zum Anschlag über das Rohrende mit der Dicken Isolierung ziehen (gedachte Linie zwischen den Schrauben sollte ungefähr parallel zum Beckenboden sein)
8. Schrauben aus dem Diffusor entfernen
9. ggf. raus gedrücktes Fett am Kon-/Diffusor entfernen
10. Isolierscheiben in Richtung Kon-/Diffusor schieben bis diese am Becken komplett anliegen
11. Osmosewasser bis max einfüllen
12. Thermoelementspitz mit etwas Druck auf Testrohr platzieren, so dass es sich im Betrieb nicht verschiebt (Thermoelement möglichst nicht in größeren Vertiefungen des Rohres platzieren)
13. Becken mit Deckel schließen und Deckel mit Flügelmuttern fixieren
14. Schlauch an Deckelauslass montieren
15. Eimer unter Schlauch stellen und Kupferplatte auf Eimer legen

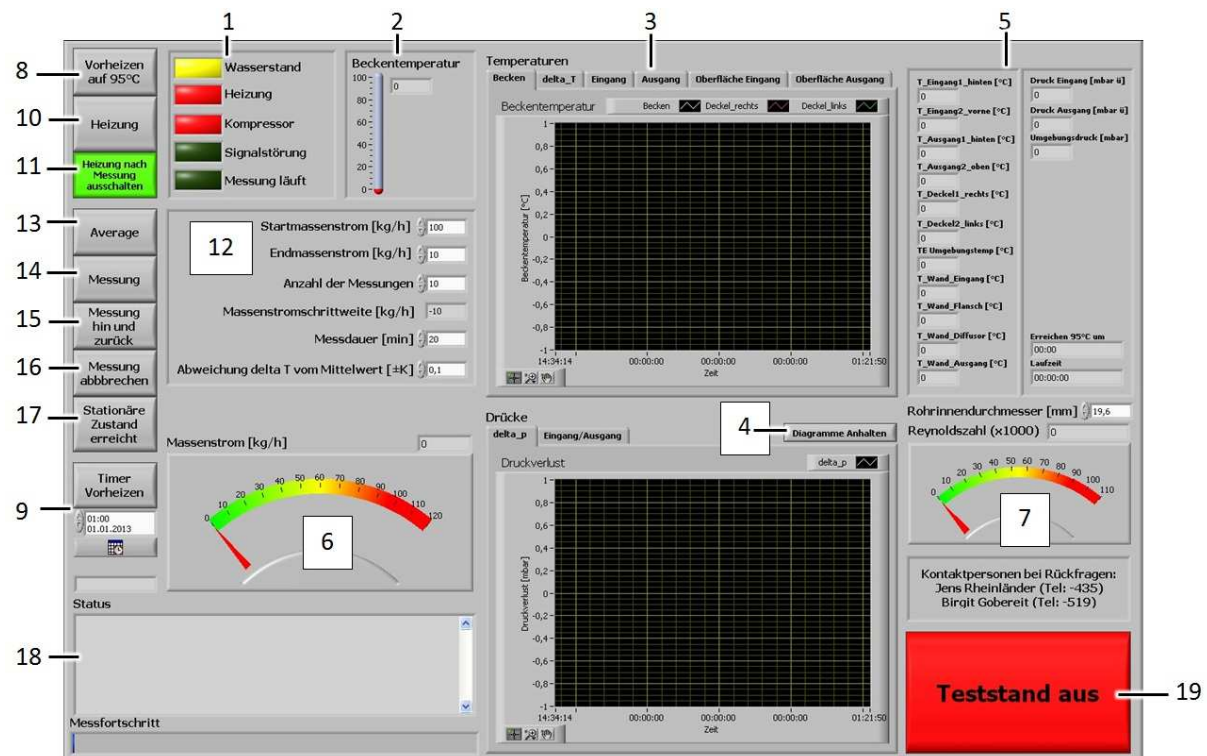
**Rohrdemontage:**

1. Schlauch vom Deckel demontieren
2. Beckendeckel Abnehmen (beim Abstellen darauf achten, dass die Pt100-Widerstandsthermometer im Deckel nicht beschädigt werden)
3. Isolierscheiben vom Beckenrand wegschieben (ggf. unter Zuhilfenahme von Demontageschrauben)
4. lange Schrauben in Diffusor montieren
5. Diffusor mit Hilfe von leichten Hammerschlägen abwechselnd auf die beiden Schraubenköpfe in Richtung des Drucksensors schlagen, bis Rohrende am Diffusor frei liegt
6. Testrohr aus dem Konfusor ziehen und Diffusor mit Hilfe des Testrohres so weit in das Auslassrohr schieben, bis Testrohr aus dem Becken genommen werden kann
7. Enden des Testrohres abwischen und Isolierscheiben entfernen

**Checkliste vor Beginn der Messung:**

- ☐ Eingebautes Testrohr
- ☐ Genügend Osmosewasser eingefüllt (bis max)
- ☐ Becken geschlossen
- ☐ Kondensationseimer unter Schlauch
- ☐ Wasserkühlung angeschlossen
- ☐ Alle Betätigungshebel des Kompressors auf „Aus“
- ☐ Folgende Stecker in Steckdosenleiste: 24V-Versorgung, Trennverstärker, Relais Heizung
- ☐ USB-Kabel zwischen ICPCON-Modul I-7561 und Laptop
- ☐ Cross-Over-Netzwerkkabel zwischen LogMessage500 und Laptop
- ☐ Heizungsregler auf Maximum-Anschlag (120°C)
- ☐ Klimaanlage eingeschaltet

## Benutzeroberfläche:



### 1 Signalanzeigen:

- Wasserstand: grün = Wasserstand über min, gelb = zu wenig Wasser
- Heizung: grün = Heizung an, rot = Heizung aus
- Kompressor: grün = Kompressor an, rot = Kompressor aus
- Signalstörung: leuchtet = Kommunikation zwischen Programm und I/O-Modulen funktioniert nicht, leuchtet nicht = Kommunikation funktioniert
- Messung läuft: leuchtet = Massenstrom ist eingestellt und mindestens eine Messdauer wurde abgewartet

### 2 Anzeige der Beckentemperatur

### 3 Diagramme für Temperatur- und Druckverlauf

### 4 Stoppt die Aktualisierung, um ein Zoomen in den Diagramme zu ermöglichen

### 5 Numerische Anzeige der aktuell gemessenen Werte

### 6 Massenstromanzeige

### 7 Reynoldszahlanzeige

### 8 Heizung wird so lange eingeschaltet, bis 95°C im Becken erreicht ist

### 9 Timer für den automatischen Beginn des Vorheizens auf 95°C (auf max. 24h in der Zukunft einstellbar)

### 10 Heizung ein-/ausschalten

- 11 Heizung nach Beendigung der eingestellten Messserie ausschalten
- 12 Konfigurationen für Messreihe:
  - Startmassenstrom: 1. Massenstrom der Messserie
  - Endmassenstrom: letzte Massenstrom bzw. Wendepunkt einer Messserie
  - Anzahl der Messungen: Anzahl der Messwerte vom Start- zum Endmassenstrom
  - Messdauer: Zeitkriterium für stationären Zustand
  - Abweichung  $\Delta T$  vom Mittelwert: Abweichungskriterium für Schwankung der Temperaturdifferenz für Definition des stationären Zustandes
- 13 Glätten der Messwerte über 4 Werte
- 14 Messung: Messserie starten, Konfiguration der Messserie kann nur nach Abbrechen der Messung geändert werden
- 15 Messung hin und zurück: Programm führt redundante Messung durch, Messserie vom Startmassenstrom zum Endmassenstrom und dann wieder zum Startmassenstrom, d.h. jeder Messpunkt wird zwei Mal angefahren
- 16 Messung abbrechen: Messserie wird abgebrochen, Teststand heizt weiter und Parameter können neu eingestellt werden
- 17 Stationäre Zustand erreicht: manuelle Speicherung der aktuellen Werte, ermöglicht Weiterführung der Messreihe falls der definierte stationäre Zustand nicht oder zu langsam erreicht wird (z.B. durch zu großes Rauschen)
- 18 Statusmeldungen zu abgeschlossenen Messungen und Meldung wann Vorheizen begonnen bzw. beendet wurde
- 19 Teststand aus: Programm wird beendet und Teststand in Ruhezustand (Heizung aus, Kompressor auf niedrigste Drehzahl) gefahren

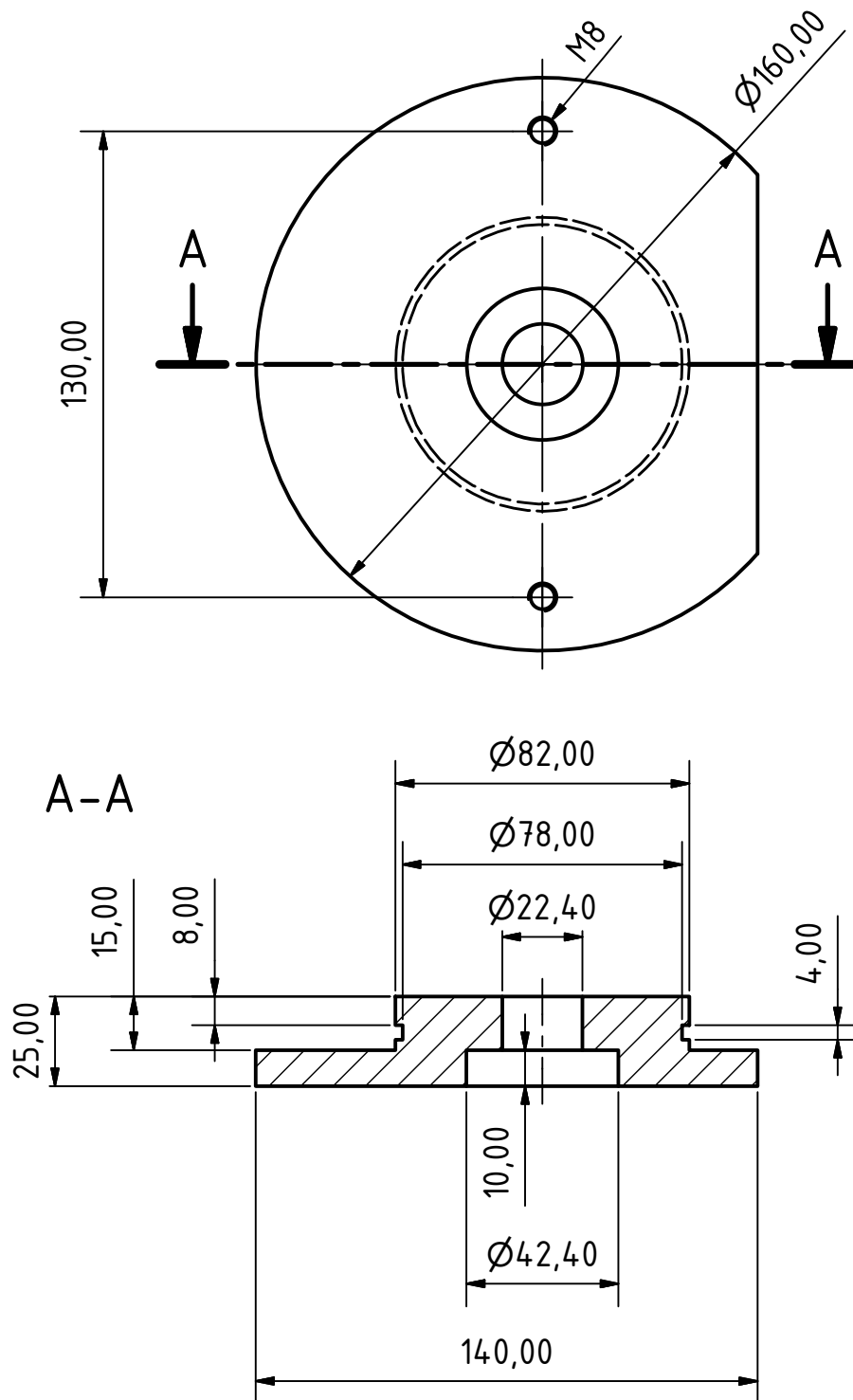
**Durchführung der Messung:**

1. Spannungsversorgung der Steckdosenleiste herstellen
2. Laptop einschalten und anmelden (Nutzer: sfadmin; PW: AdminStart11)
3. Meldung „FILESYS: MediumError Foreign card“ an LogMessage500 mit „YES/Enter“ bestätigen  
(LogMessage500 nicht an und 24V-Spannungsquelle auch nicht, dann 1A-Sicherung prüfen)
4. Starkstromspannungsversorgung für Kompressor herstellen
5. „DataService Konfigurator“ vom Desktop starten (Delphin-OPC-Server)
6. Maximalen Massenstrom mit „DCON\_Utility“ vom Desktop testen (Spannung des Channel0 am analogen Ausgangsmodul langsam vergrößern, bis der Kompressor abbläst und Massenstrom beobachten)
7. „NAPOPC\_ST DA Server“ vom Desktop starten (ICPCON-OPC-Server)
8. „Thermohydraulischer\_Teststand.exe“ vom Desktop starten
9. „Heizung“-Schaltfläche drücken -> Heizung-LED grün
10. Prüfen, ob LED an Heizungssteckdose leuchtet, wenn nicht dann 12,5A-Sicherung prüfen
11. Startmassenstrom, Endmassenstrom (10-100kg/h), Anzahl der Messungen, Messdauer und Toleranz eingeben
12. Schaltfläche „Heizung nach Messung ausschalten“ betätigen (grün),  
um Heizvorgang nach abgeschlossenen Messungen zu stoppen
13. „Messung“ drücken, damit Messung mit eingestellter Konfiguration durchgeführt wird  
(die Konfiguration kann jetzt nicht mehr verändert werden)
14. Kompressor durch umlegen des Schalters auf „Ein“ starten -> Kompressor-LED grün
15. Wasser für Kühlung zuführen (Achtung: Hebel langsam öffnen, bis langsamer Durchfluss)
16. Warten bis Messvorgang abgeschlossen
17. Messdaten sind im Ordner „Thermohydraulischer\_Teststand/Messungen“ gespeichert  
(Format: [Jahr]\_[Monat]\_[Tag]\_\_[Stunde]\_[Minute]\_Messung\_[Massenstrom].txt)  
LabVIEW-Programm mit „Teststand aus“ beenden
18. Alle geöffneten Anwendungen am Laptop beenden und herunterfahren
19. Alle Hebel am Kompressor wieder auf „Aus“
20. Wasserkühlung abschalten
21. Alle Spannungsversorgungen des Teststandes trennen



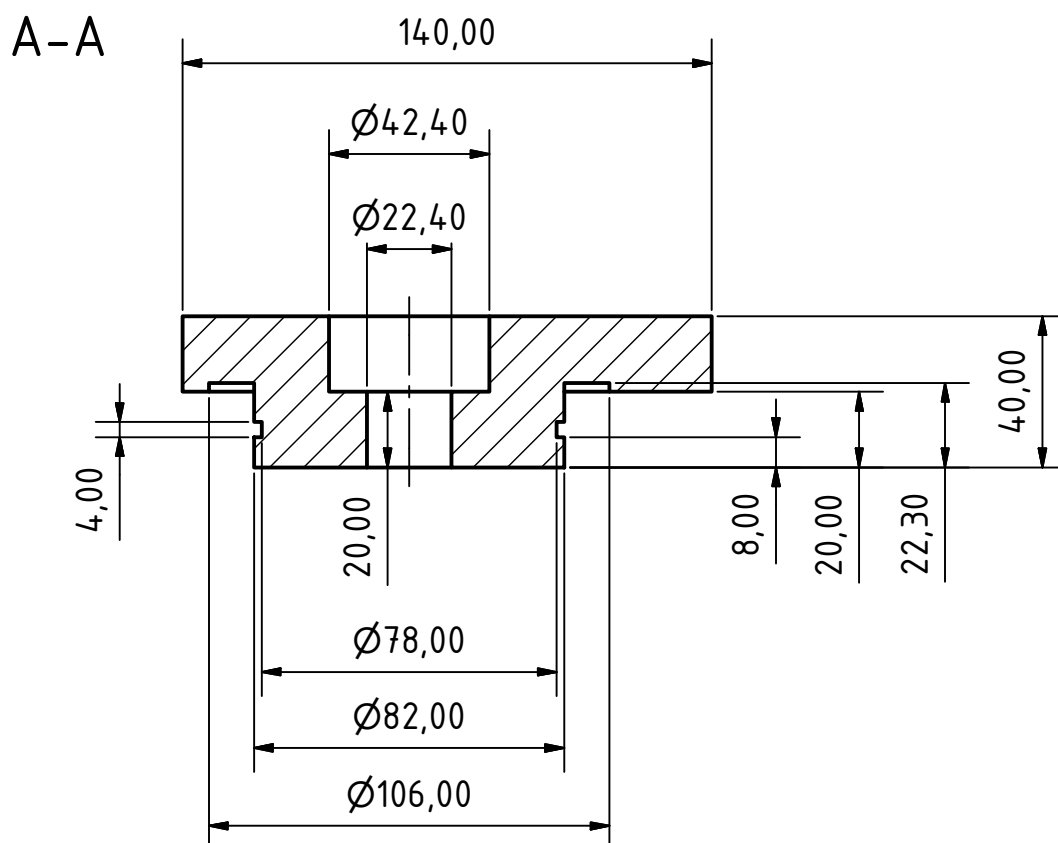
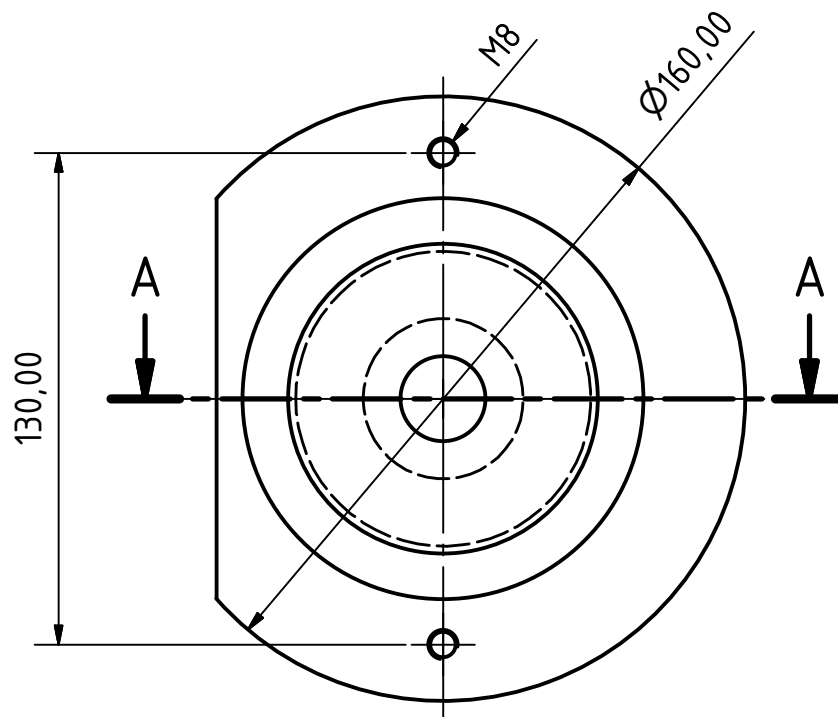
## **17.2 Fertigungszeichnung Isolierscheiben**

Nachfolgend sind die Fertigungszeichnungen der beiden PVC-Isolierscheiben angefügt.



alle Kanten angefast

Werkstückkanten DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768 -mK Tolerierung DIN 7167				Status: Freigegeben		Oberfläche DIN ISO 1302		Maßstab: 1:2  (Werkstoff, Halbzeug) PVC		Gewicht: -	
					Datum	Name		Titel:  Isolierung Konfusor (15mm)  Projekt: Thermohydraulischer Teststand			
				Gezeichnet	29.08.2013	rhei_je					
				Kontrolliert							
				Norm							
				Firma:				Bauteilnummer:		Blatt:	
				Deutsches Zentrum für						1	
				Luft- und Raumfahrt e.V.						A4	
Zust.	Änderungen	Datum	Name	Datei: Isolierung_15.ipt					CAD-System: Inventor 2012 Prof.		



alle Kanten angefast

Werkstückkanten DIN ISO 13715 Allgemeintoleranz ISO 2768 -mK Tolerierung DIN 7167				Status: Freigegeben		Oberfläche DIN ISO 1302		Maßstab: 1:2		Gewicht: -		
								(Werkstoff, Halbzeug) PVC				
					Datum	Name		Titel:  Isolierung Diffusor (20mm)  Projekt: Thermohydraulischer Teststand				
				Gezeichnet	29.08.2013	rhei_je						
				Kontrolliert								
				Norm								
				Firma: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. 				Bauteilnummer:		Blatt:		
										1		
										A4		
Zust.	Änderungen	Datum	Name	Datei: Isolierung_20.ipt					CAD-System: Inventor 2012 Prof.			